

Cálculo da evapotranspiração a partir da temperatura radiativa nas culturas de alface e tomate

Isabel Simão de Almeida

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Agronómica

Orientador: Doutora Isabel Maria Cerqueira Lopes Alves

Júri:

Presidente: Doutor José Luís Monteiro Teixeira, Professor Associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Doutora Isabel Maria Cerqueira Lopes Alves, Professora Associada do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa;

Doutor Pedro Rodrigues, Professor Adjunto da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viseu.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não se deve apenas a mim, mas a uma série de pessoas que me apoiaram e incentivaram, às quais deixo expresso o meu agradecimento.

À minha professora orientadora Isabel Alves, pela constante disponibilidade, por todos os ensinamentos, pelo espírito crítico que me impôs a analisar as situações, e por todas as sugestões dadas ao longo do trabalho.

Aos professores da minha vida, pela inspiração e conhecimento transmitido, que contribuíram decisivamente na minha formação enquanto pessoa e profissional, para ir em busca do conhecimento não optando por caminhos fáceis e redutores mas por caminhos desafiantes.

Ao professor José Paulo de Melo e Abreu, por todos os conhecimentos transmitidos em modelação ambiental, pela inspiração e motivação constante.

À minha grande amiga Patrícia Almeida, por todo o tempo partilhado, pelo seu companheirismo, pelo o apoio, o incentivo, a motivação e confiança que dispôs em mim e que foram determinantes em todos os momentos.

Às minha antigas colegas do IFAP, Sara Azevedo Gomes e Elsa Lousa, por todo o incentivo dado ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, à minha irmã, aos tios e avós por todo o apoio, incentivo, paciência e amizade e ao Francisco meu sobrinho, por toda a energia e alegria partilhadas.

Dedico este trabalho aos que acreditaram em mim ao longo deste caminho.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo encontrar uma forma de determinar a evapotranspiração recorrendo a dados de fácil obtenção como é o caso da temperatura radiativa, e utilizá-la na programação da rega tanto numa cultura de coberto total como parcial.

Foram utilizados dados medidos num ensaio já realizado de radiação, temperatura do ar com termómetro seco e molhado e de velocidade do vento. A evapotranspiração determinada utilizando dados da temperatura radiativa foi comparada com a evapotranspiração obtida pelo método da razão de Bowen na cultura da alface e pelo método aerodinâmico proposto por Itier (1981) na cultura do tomate. Foi feita uma análise de regressão entre a evapotranspiração calculada com a temperatura radiativa e a evapotranspiração determinada a partir dos métodos utilizados para comparação, determinando-se a sua correlação linear e o erro padrão de estimativa.

Os resultados obtidos demonstraram uma elevada correlação linear e um erro padrão de estimativa baixo em ambas as culturas quando se considerou o método proposto por Troufleau *et al.* (1997) que parte de uma relação linear entre temperaturas (do ar, aerodinâmica e radiativa).

Palavras-chave: Evapotranspiração, temperatura radiativa, temperatura aerodinâmica.

ABSTRACT

The aim of this study was to determine evapotranspiration, with easy-to-obtain data such as the radiative temperature and use it in irrigation scheduling of both, a total covered culture as lettuce and a partial one as the tomato.

The data used in this work, the radiation, the dry and wet bulb temperature and the wind speed, was obtained from an essay already carried out. The evapotranspiration determined with radiative temperature measurements was compared with the one obtained by the Bowen ratio method in lettuce and with the one from the aerodynamic method proposed by Itier (1981) in the tomato culture. This was made using a regression analysis based on linear correlation and the standard error of estimate.

The obtained results demonstrated a high linear correlation and a low standard error of estimate in both cultures when it was considered the method proposed by Troufleau *et al.* (1997) that uses a linear relation between temperatures (air, aerodynamic and radiative).

Key words: Evapotranspiration, radiative temperature, aerodynamic temperature.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS.....	2
2.1. Temperatura do coberto.....	2
3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO	3
3.1. Considerações gerais.....	3
3.2. Balanço da radiação (R_n) e fluxo de calor de e para o solo (G)	4
3.3. Transferências de calor sensível (H) e de calor latente (LE)	6
3.4. Medição da Evapotranspiração	8
3.4.1. Métodos hidrológicos	8
3.4.2. Métodos micrometeorológicos.....	9
3.4.3. Método do fluxo de seiva	12
3.5. Modelação da Evapotranspiração	12
3.5.1. Modelação em cobertos contínuos.....	12
3.5.2. Modelação em cobertos descontínuos	13
3.6. Resistências aos fluxos.....	14
3.6.1. Resistência aerodinâmica para a transferência da quantidade de movimento	14
3.6.2. Resistência aerodinâmica aos fluxos de calor	16
3.7. Resistência do coberto (r_c)	17
3.8. Determinação do fluxo de calor sensível a partir da temperatura radiativa da superfície	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1. Caracterização do local de ensaio.....	23
4.2. Descrição do ensaio.....	23
4.2.1. Alface.....	23
4.2.2. Tomate.....	24
4.3. Medição das variáveis meteorológicas e da temperatura radiativa	24
4.4. Condições meteorológicas durante o período de ensaio	25
4.5. Tratamento dos dados	30
4.5.1. Determinação dos parâmetros aerodinâmicos d e z_o	30
4.5.2. Cálculo do balanço da radiação da vegetação (R_{nc}) e do fluxo de calor de e para o solo (G)	30
4.5.3. Cálculo da resistência aerodinâmica (r_a)	31
4.5.4. Determinação do fluxo de calor latente (LE) pelo método aerodinâmico na cultura do tomate.....	31
4.5.5. Determinação do fluxo de calor latente (LE) pelo método da razão de Bowen na cultura da alface	31

4.5.6.	Determinação da temperatura do bolbo molhado da superfície (T_{wo})	32
4.5.7.	Determinação do fluxo de calor sensível (H) utilizando a temperatura radiativa (T_r).....	33
4.5.8.	Determinação de outros parâmetros climáticos.....	33
4.6.	Análises Estatísticas	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
	<i>Balanço da radiação líquida do coberto (R_n) e balanço da radiação líquida da vegetação (R_{nc})</i>	<i>35</i>
	<i>Densidade de fluxo de calor de e para o solo (G)</i>	<i>36</i>
	<i>Densidade de fluxo de calor sensível (H).....</i>	<i>36</i>
	<i>Densidade de fluxo de calor latente (LE)</i>	<i>37</i>
	<i>Temperatura radiativa (T_r) e temperatura de bolbo molhado da superfície (T_{wo})</i>	<i>39</i>
	<i>Temperatura radiativa (T_r) e temperatura aerodinâmica (T_o).....</i>	<i>43</i>
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
ANEXO I – Organograma do modelo proposto por Itier (1981) para o cálculo do H . u_1 e u_2 são velocidades do vento medidas a duas alturas diferentes z_1 e z_2 , g é a aceleração da gravidade e θ a temperatura em (K) (adaptado de Itier, 1981).		ii

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Diagrama das resistências aos fluxos no modelo para culturas esparsas (adaptado de Shuttleworth & Wallace, 1985).	14
Figura 3.2 - Esquema ilustrativo de um modelo de uma camada, evidenciando a posição do sensor e a temperatura compósita captada, pois inclui a temperatura do solo (T_{solo}) e a temperatura do coberto (T_c) (adaptado de Kustas, 1990).	20
Figura 4.1 – Esquema da instrumentação usada no ensaio da alface e do tomate.	25
Figura 4.2 - Radiação líquida (R_n) em $W\ m^{-2}$ registada durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.	26
Figura 4.3 - Temperatura máxima, média e mínima do ar (T_a) registada durante o período de ensaio na cultura: A) alface; B) tomate.	27
Figura 4.4 - Temperatura do ar (T_a) registada durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.	27
Figura 4.5 - Valores de humidade relativa (HR) registados durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.	27
Figura 4.6 - Relação entre a temperatura do ar (T_a) e a humidade relativa (HR) durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.	28
Figura 4.7 - Relação entre a temperatura do ar (T_a) e o défice de pressão de vapor (DPV) durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.	28
Figura 4.8 - Valores da temperatura do ar (T_a) e do défice de pressão de vapor (DPV) verificados no dia 191 na cultura da alface (A), e no dia 178 na cultura do tomate (B).	28
Figura 4.9 - Velocidade do vento (u) a 1.58 m do solo, registada durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.	29
Figura 4.10 – Em A) condições de estabilidade da atmosfera avaliadas pelo número de Richardson (Ri) e em B) a relação entre a velocidade do vento e as condições de estabilidade da atmosfera registadas durante o período de ensaio na cultura do tomate.	29
Figura 5.1 - Evolução diurna do balanço da radiação líquida (R_n) medido, do balanço da radiação líquida da vegetação (R_{nc}) e do ângulo zenital do sol (φ) (os resultados da alface são apresentados a verde e os do tomate a vermelho).	35
Figura 5.2 – Evolução diurna da densidade de calor de e para o solo ($W\ m^{-2}$) determinada ao longo do período de ensaio para ambas as culturas.	36
Figura 5.3 - Evolução diurna da densidade de fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) determinada ao longo do período de ensaio para a alface (H_{fB}) e para o tomate (H_{lt}).	37

Figura 5.4 - Evolução diurna da densidade de fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$) determinada ao longo do período de ensaio para a alface (LE_{rB}) e para o tomate (LE_{lt}).	38
Figura 5.5 – Evolução diurna do balanço da radiação medida (R_n), da densidade de fluxo de e para o solo (G), da densidade de fluxo de calor sensível (H), e da densidade de fluxo de calor latente (LE): A) cultura da alface e B) cultura do tomate.....	39
Figura 5.6 - Relação entre a temperatura medida com o termómetro de infravermelhos (T_r) e a temperatura de bolbo molhado determinada à superfície da cultura (T_{wo}): A) na cultura da alface; B) na cultura do tomate. Os parâmetros da regressão são os seguintes: R^2 , coeficiente de determinação e SEE , a estimativa do erro padrão da regressão.	40
Figura 5.7 - Relação entre os valores da razão de Bowen (β) determinados nas culturas da alface e do tomate e a diferença da T_r e T_{wo}	41
Figura 5.8 – Relação entre os valores determinados da r_c da alface e do tomate e a diferença da T_r e T_{wo}	41
Figura 5.9 - Relação entre os valores verificados do DPV durante o período de ensaio na alface e do tomate e a diferença da T_r e T_{wo}	42
Figura 5.10 - Relação entre LE_{eo} e LE_{rB} na cultura da alface em A) e LE_{eo} e LE_{lt} na cultura do tomate em B).	43
Figura 5.11 - Evolução diurna da temperatura radiativa (T_r) e da temperatura aerodinâmica (T_o) medida e estimada respetivamente: A) na cultura da alface no dia 185; B) na cultura do tomate no dia 179.	44
Figura 5.12 - Diferença entre T_o determinada e a T_r medidas, nas culturas da alface e do tomate ao longo do período de ensaio. Em que DOY refere-se ao dia do ano.	45
Figura 5.13 - Regressão linear simples entre a T_o e a T_r : A) na cultura da alface e B) na cultura do tomate. Os parâmetros da regressão são os seguintes: R^2 , coeficiente de determinação.	45
Figura 5.14 - Relação entre a T_o e a T_r na cultura do tomate, com duas zonas definidas.	46
Figura 5.15 – Relação entre o quociente de LE e H , a R_n , a T_a e a T_r e a sua evolução ao longo do dia: A) na cultura da alface e em B) na cultura do tomate. A razão LE/H é determinada a partir do método da razão de Bowen na cultura da alface e do método proposto por Itier (1981) na cultura do tomate.	47
Figura 5.16 - Relação entre os valores verificados do DPV (Pa), durante o período de ensaio da alface e do tomate, e a diferença da T_o e T_r	48
Figura 5.17 - Relação entre os valores da resistência aerodinâmica (ra) ($s\ m^{-1}$), durante o período de ensaio da alface e do tomate, e a diferença da T_o e T_r	48
Figura 5.18 - Relação entre os valores da razão de Bowen (β), durante o período de ensaio da alface e do tomate, e a diferença da T_o e T_r	49

Figura 5.19 - Regressão linear entre a $T_r - T_o$ e $T_r - T_a$: A) na cultura da alface e B) na cultura do tomate. Os parâmetros da regressão são os seguintes: R^2 , coeficiente de determinação e SEE a estimativa de erro padrão.	50
Figura 5.20 - Relação entre H_{Tr} e H_{lt} na cultura do tomate e H_{Tr} e H_{rB} na cultura da alface.	52
Figura 5.21 - Relação entre LE_{Tr} e LE_{lt} na cultura do tomate e LE_{Tr} e LE_{rB} na cultura da alface. Com SEE, a estimativa do erro padrão.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Métodos para medição da <i>ET</i>	8
Quadro 4.1 - Instrumentação para medição das variáveis meteorológicas.....	25
Quadro 5.1 – Temperaturas mínima e máxima, média, desvio padrão e variância das temperaturas radiativa e aerodinâmica nas culturas da alface e do tomate.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_c	Ascensão capilar
B	Número de Stanton
c_p	Capacidade térmica mássica do ar a pressão constante
C_s	Capacidade calorífica volumétrica do solo
$CWSI$	Índice de Stress Hídrico da Cultura
d	Altura de deslocação do plano de referência
D	Água drenada
DPV	Défice de pressão de vapor
e_a	Pressão atual de vapor do ar ao nível de referência da atmosfera
e_{as}	Pressão atual de vapor de água da superfície
e_s	Pressão de vapor saturante do ar
E_s	Escoamento superficial
E_{se}	Escoamento subsuperficial de entrada
E_{ss}	Escoamento subsuperficial de saída
ET	Evapotranspiração da cultura
G	Fluxo de calor de e para o solo
g_{st}	Condutância estomática
h_c	Altura do coberto
H	Fluxo de calor sensível
H_c	Fluxo de calor sensível da vegetação
HR	Humidade relativa
H_s	Fluxo de calor sensível do solo/ substrato
k	Constante de von Karman
k_{be}	Coeficiente de extinção da radiação pelo coberto proposto por Campbell e Norman (1998)
k_e	Coeficiente de extinção da radiação pelo coberto
K_H	Coeficiente de difusão de calor sensível
K_V	Coeficiente de difusão de calor latente
k_T	Condutividade térmica do solo
L	Calor latente de vaporização
LAI	Índice de área foliar
LE	Fluxo de calor latente
P	Quantidade de água proveniente da precipitação
q^*	Humidade específica do ar
R	Quantidade de água aplicada através da rega
r_a	Resistência aerodinâmica
r_a^c	Resistência ao fluxo desde a folha até à camada de ar dentro do coberto
r_{aH}	Resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível
r_{aM}	Resistência aerodinâmica à quantidade de movimento
r_a^s	Resistência ao fluxo no interior do coberto
r_{aV}	Resistência aerodinâmica à transferência de calor latente
r_b	Resistência adicional
r_c	Resistência do coberto
r_h	Resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível por excesso
Ri	Número de Richardson
r_r	Resistência adicional radiativa
r_s^c	Resistência estomática do coberto
r_s^s	Resistência à evaporação de água da superfície do solo

r_{st}	Resistência estomática
R_l	Radiação incidente de longo comprimento de onda (> 4000 nm)
R_n	Balanço da radiação líquida
R_{nc}	Balanço da radiação líquida da vegetação
R_{ns}	Balanço da radiação líquida do solo
R_s	Radiação incidente de curto comprimento de onda (< 4000 nm)
T	Transpiração
T_a	Temperatura do ar à altura de referência
T_o	Temperatura aerodinâmica da superfície
T_r	Temperatura radiativa da superfície
T_s	Temperatura da superfície
$T_{solo}(z)$	Temperatura do solo à profundidade z
T_w	Temperatura de bolbo molhado
T_{wo}	Temperatura de bolbo molhado à superfície
u^*	Velocidade de fricção
z	Altura acima da superfície
z_o	Rugosidade aerodinâmica da superfície
$z_{oH,V}$	Rugosidade da superfície relativamente ao calor sensível ou ao calor latente
α	Coeficiente de reflexão para a radiação de curto de comprimento de onda (< 4000 nm)
β	Razão de Bowen
γ	Constante psicrométrica
Δ	Declive da curva de pressão de vapor saturante
ΔS	Variação do armazenamento de água no solo
Δt	Intervalo de tempo
ΔT	Variação da temperatura
Δu	Variação da velocidade do vento
Δz	Espessura de uma camada de solo
ϵ	Emissividade
ϵ_λ	Função de Planck
LE_c	Fluxo de calor latente a partir da vegetação
LE_s	Fluxo de calor latente a partir do solo/ vegetação
ρ_a	Densidade do ar
ρ_l	Coeficiente de reflexão para a radiação de longo comprimento de onda (> 4000 nm)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
f	Fluxo de quantidade de movimento
$\bar{\sigma}$	Declinação solar
T	Comprimento de onda da radiação
φ	Ângulo zenital
ψ_H	Função de correção do transporte de calor sensível
ψ_M	Função de correção da estabilidade para a transferência de quantidade de movimento
ψ_V	Função de correção para o transporte de calor latente
Ω	Factor de agrupamento “clumping factor”

1. INTRODUÇÃO

O fornecimento da água em quantidade suficiente para satisfazer as necessidades de uma cultura é essencial para assegurar a sua sobrevivência e maximizar a produção. A água toma este papel fundamental pois é indispensável na actividade fisiológica e nos processos de transporte das plantas (Jones *et al.*, 1998).

Nos últimos 50 anos, a produção agrícola mundial cresceu cerca de 2,5 a 3 vezes em relação ao valor registado no início desse período, já a área cultivada apresentou apenas um crescimento de cerca de 12%. Cerca de 40% deste aumento da produção deveu-se à duplicação das áreas regadas. Assim estima-se que atualmente 11% da superfície terrestre seja utilizada para a agricultura e que esta beneficie de 70% da água retirada dos aquíferos, canais de água e lagos. A área regada tem apresentado uma taxa de crescimento de 0,6% por ano (FAO, 2011).

Estima-se que 60% da água retirada dos recursos naturais, quer seja de aquíferos, rios ou lagos, é consumida diretamente por evaporação ou no processo de transpiração das plantas e que a restante parte retorna ao sistema hidrológico local. O aumento das áreas regadas possibilitou, entre outros benefícios, o aumento da produção. Contudo, muitos dos sistemas agrícolas que utilizam rega nas suas produções utilizam sistemas que funcionam muito abaixo do possível potencial, veja-se no caso da Europa ocidental e central em que a eficiência do uso da água é de cerca de 43%. Tem sido demonstrado que a razão entre a água necessária para o crescimento das plantas e a água retirada é baixa, e que chega a ser 3 vezes mais a água utilizada na rega do que aquela que é efetivamente necessária (FAO, 2011).

Para que se aumente a eficiência do uso da água, visando a maior produtividade mas também a sustentabilidade do sistema, é essencial estimar a evapotranspiração com precisão, uma vez que esta componente representa a maior parte do consumo da água proveniente da rega e da precipitação (Gowda *et al.*, 2007).

Para determinar a evapotranspiração têm-se desenvolvido muitos métodos que diferem no seu grau de complexidade, quer nos parâmetros necessários a conhecer quer na sua aplicabilidade a cobertos contínuos ou descontínuos. Assim, o objetivo principal deste trabalho consistiu em determinar a evapotranspiração utilizando valores de temperatura radiativa medidos com termómetro de infravermelhos numa cultura de coberto contínuo e numa de coberto descontínuo.

Nos dois primeiros capítulos são apresentados os aspectos teóricos relativos às necessidades hídricas das culturas, e à determinação da evapotranspiração com recurso a diversos métodos. De seguida, é apresentado o ensaio experimental e os métodos utilizados, culminando com a análise e discussão dos resultados obtidos e principais conclusões.

2. NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS

As culturas expostas a determinadas operações culturais e condições ambientais apresentam necessidades de água que correspondem à sua procura evapotranspirativa (Pereira, 2004). A manutenção da ausência de *stress* hídrico, ou seja, a permanência da cultura em condições de conforto hídrico proporciona não só uma maior produtividade mas também a sobrevivência da cultura, na medida em que a perda de água por evapotranspiração evita a ocorrência de temperaturas elevadas que inviabilizam o seu crescimento e desenvolvimento (Gama, 1987).

A rega surge precisamente para fornecer água às plantas de forma a colmatar a que é perdida pela evapotranspiração e que não é repostada pela precipitação em quantidade suficiente. Depreende-se desta ideia, e como afirma Oliveira (2011), que a rega é uma prática que se realiza com o intuito de corrigir as deficiências do clima. O Verão em Portugal é caracterizado por temperatura elevada e carência de chuvas, pelo que a rega toma especial importância nesta estação.

A água tem um papel muito importante nas plantas, e por isso importa conhecer de facto as necessidades hídricas para melhor gerir a instalação de um sistema de regadio e a zona regada. A manutenção da atividade fisiológica da planta e o sistema de transporte de nutrientes e outros agentes reguladores da planta são unicamente possíveis porque a água constitui o meio para que ocorram esses processos. Para além disso, e como já referido, o fornecimento de água, quando este não ocorre naturalmente (precipitação), é importante para permitir o arrefecimento resultante da transpiração da planta (Jones *et al.* 1998, Oliveira, 2011).

Para conhecer a evapotranspiração existem diversos métodos de medição ou de estimação que têm contornos diferentes quando se trata de uma cultura de coberto contínuo ou descontínuo. Atualmente, a utilização de métodos que são dependentes da resposta das plantas ao *stress* tem tomado maior relevância e interesse. A planta quando está submetida a *stress* hídrico fecha os estomas para diminuir a perda de água, ou seja, a transpiração. Uma consequência importante desse fecho é a diminuição da energia dissipada, o que conduz ao aumento da temperatura da folha. Usar a temperatura da folha ou do coberto como indicador do *stress* de água é uma das abordagens possíveis e recorrentes desde o início dos anos 80 (Jones, 1999).

2.1. Temperatura do coberto

Como a transpiração resulta no arrefecimento da superfície das folhas, a temperatura do coberto permite determinar o estado hídrico da cultura (Jensen *et al.*, 1990). A temperatura do coberto e a temperatura de superfície são termos que têm sido referidos na bibliografia, e que se referem a uma temperatura correspondente à interface entre o solo-coberto-atmosfera, sendo que não é clara a sua distinção (Norman & Becker, 1995).

Ao longo dos anos desenvolveram-se sensores de medição remota da temperatura, nomeadamente do coberto, que são maioritariamente utilizados para determinar índices que permitem determinar o *stress* hídrico da cultura. O termómetro de infravermelhos mede a radiação térmica que é

emitida pela superfície num determinado campo de visão e numa banda de comprimento de ondas específica. Se para superfícies homogêneas a aplicação do conceito de temperatura de superfície é simples e pode ser medida facilmente com o uso da radiometria, para superfícies heterogêneas o equilíbrio térmico dentro do campo de visão do termómetro não é tão evidente e a definição de temperatura de superfície é mais imprecisa, sendo necessários mais cuidados no acto de medição (Norman & Becker, 1995).

Existem vários índices que têm por base a temperatura radiativa obtida pelo termómetro de infravermelhos, sendo o mais utilizado o Índice de Stress Hídrico da Cultura (CWSI – “Crop Water Stress Index”), que foi proposto por Idso *et al.* (1981), e que permite quantificar o estado hídrico da cultura. O método consiste na determinação de duas linhas, uma designada de “*non-water-stressed baseline*” que se refere a uma cultura bem abastecida de água, cuja resistência do coberto (r_c) é de aproximadamente zero, e a linha de máximo stress da cultura designada de “*non-transpiring crop*”, cuja $r_c \sim +\infty$. As linhas deste método são determinadas a partir da relação entre a diferença da temperatura da superfície e a temperatura do ar medida a uma altura de referência ($T_s - T_a$) e o défice de pressão de vapor (DPV). A utilização deste índice traz alguns inconvenientes na medida em que as linhas referidas não podem ser transpostas para outros locais que não os de determinação e são válidas apenas perante situações de céu limpo (Alves & Pereira, 2000).

Outros estudos procuram encontrar uma relação entre a temperatura radiativa T_r e outras temperaturas por forma a possibilitar a determinação da evapotranspiração, tais como a temperatura de bolbo molhado da superfície (T_{wo}) ou a temperatura aerodinâmica (T_o) (Alves & Pereira, 2000).

3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

3.1. Considerações gerais

O maior consumo da água da rega e da água proveniente da chuva acontece por evapotranspiração (ET), que inclui a transpiração (T) das plantas e a evaporação de água (E). A transpiração é uma forma específica de evaporação em que a água contida nos tecidos vegetais é removida para a atmosfera a partir dos estomas. Existe uma série de factores que influenciam o comportamento dos estomas, tais como a temperatura e a humidade do ar, e o potencial hídrico do solo (Jarvis, 1976). A evaporação inclui a evaporação de água do solo e da água no estado livre a partir da superfície da cultura e é influenciada por uma série de factores tais como o conteúdo de água do solo, o tipo de solo, a presença de coberturas e as condições ambientais (Burt *et al.*, 2005). Esta última tem um peso maior na evapotranspiração à medida que a cobertura do solo pela cultura diminui, o que justifica que as duas componentes tenham maior importância num coberto descontínuo, cuja área exposta à radiação é superior (Paço, 2003).

A ET pode ser medida ou estimada de diferentes formas, mais ou menos complexas, sendo que a mais utilizada é como termo residual do balanço de energia.

3.2. Balanço da radiação (R_n) e fluxo de calor de e para o solo (G)

O conhecimento do balanço da radiação ou da radiação líquida (R_n) e do fluxo de calor de e para o solo (G) é necessário para poder estimar os fluxos de calor sensível (H) e de calor latente (LE). A R_n é dada pela seguinte expressão:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + (1 - \rho_l) R_l - \epsilon \int \epsilon_\lambda dT \quad [3.1]$$

onde α é o coeficiente de reflexão para a radiação de curto comprimento de onda (<4000 nm), ou albedo, R_s é a radiação incidente de curto comprimento de onda, ρ_l é o coeficiente de reflexão para a radiação de longo comprimento de onda (>4000 nm), R_l é a radiação incidente de longo comprimento de onda, ϵ é a emissividade e ϵ_λ é a função de Planck que indica a energia da radiação de comprimento de onda T que é emitida por um corpo negro à mesma temperatura da superfície em estudo.

No caso específico das plantas, as folhas têm um ρ_l muito pequeno e por isso um ϵ praticamente igual a 1. Campbell & Norman (1998) sugerem que se utilize para a maior parte das superfícies naturais um valor entre 0,95 e 1. Ainda se integrarmos o último termo da equação [3.1] entre 0 e infinito obtemos a equação de Stefan-Boltzmann, o que conduz a uma simplificação com a seguinte forma:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + R_{l,\downarrow} - \sigma T_s^4 \quad [3.2]$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_s a temperatura da superfície (K).

O ideal é medir a radiação líquida, se não o for é possível estimar cada um dos diferentes termos recorrendo a expressões com base teórica ou empíricas referidas na literatura (Adaixo, 1999). A radiação líquida pode ser dividida em duas componentes, uma relativa à vegetação (R_{nc}) e a outra relativa ao solo (R_{ns}). É frequente recorrer-se ao princípio da extinção exponencial da radiação, lei de Beer, quando se utilizam modelos de bi-camada que estimam a partição do balanço da radiação entre o solo (R_{ns}) e a vegetação (R_{nc}) (Kustas, 1990). R_{ns} pode ser determinado a partir da expressão:

$$R_{ns} = R_n e^{-k_e LAI} \quad [3.3]$$

Sabendo que:

$$R_n = R_{nc} + R_{ns} \quad [3.4]$$

R_{nc} é determinado pela conjugação das duas equações anteriores:

$$R_{nc} = R_n (1 - e^{-k_e LAI}) \quad [3.5]$$

onde k_e é o coeficiente de extinção da radiação e o LAI o índice de área foliar. O k_e pode ser determinado para diferentes distribuições das folhas na planta. Campbell & Norman (1998) propõem que para uma cultura cujas folhas apresentem uma distribuição cónica se opte por uma distribuição elipsoidal, permitindo calcular o k_e designado agora de k_{be} :

$$k_{be} = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2 \varphi}}{x + 1.774 (x + 1.182)^{-0.733}} \quad [3.6]$$

onde x é o rácio entre a média da área projectada dos diferentes elementos do coberto na horizontal e na vertical ($x = 1$ para uma distribuição esférica das folhas, $x = 0$ para uma distribuição vertical e para uma distribuição horizontal x tende para o infinito) e φ é o ângulo zenital.

Há autores que consideram valores constantes para o k_e , tal como Norman *et al.* (1995), que propõem usar um $k_e = 0,45$ para as superfícies vegetais e Choudhury & Monteith (1988) que adoptam o valor de 0,3 para folhas horizontais distribuídas aleatoriamente.

Anderson *et al.* (1997) propõem uma reformulação da equação [3.3], em que o k_e é corrigido por um termo que depende do ângulo zenital, o que permite produzir melhor a variação da partição da radiação pelos diferentes componentes do coberto ao longo do dia:

$$R_{ns} = R_n e^{\left(\frac{-k_e LAI}{\sqrt{2} \cos(\varphi)} \right)} \quad [3.7]$$

Para o caso de cobertos heterogéneos, ainda é sugerido que se substitua o LAI pelo produto deste com um factor de agrupamento $\Omega(\varphi)$, que pode tomar o valor de 1 no caso da cultura ter um coberto aleatoriamente distribuído, inferior a 1 para culturas com um coberto mais aglutinado, e superior a 1 para um coberto mais espaçado. Pode ainda ser estimado pela seguinte fórmula que tem em conta a altura e largura das linhas (Campbell & Norman, 1998):

$$\Omega(\varphi) = \frac{\Omega(0)}{\Omega(0) + [1 - \Omega(0)] e^{-2,2(\varphi)^{[3,8-0,46p]}}} \quad [3.8]$$

onde p é o rácio entre a altura e a largura das linhas e $\Omega(0)$ é o valor do factor de ajustamento quando o $\varphi = 0^\circ$.

O fluxo de calor de e para o solo pode ser determinado a partir da lei de Fourier:

$$G = -k_T \frac{dT_{solo}(z)}{dz} \quad [3.9]$$

onde $T_{solo}(z)$ é a temperatura do solo (K) à profundidade z e k_T a condutividade térmica do solo ($W m^{-1} K^{-1}$). Geralmente o G é de uma ordem de grandeza inferior aos restantes elementos do balanço de

energia. Allen *et al.* (1998) propõem que, para um período de um dia ou um mês, se determine G da seguinte forma:

$$G = C_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad [3.10]$$

onde C_s é a capacidade calorífica volumétrica do solo ($J m^{-3} K^{-1}$), T_i a temperatura média do ar ($^{\circ}C$) no tempo i (dia ou mês), T_{i-1} a temperatura média do ar no dia ou mês anterior ($^{\circ}C$), Δt o intervalo de tempo i (dias) e Δz a profundidade efectiva do solo (m).

Se se considerarem períodos superiores a 24 horas é possível desprezar G pois a temperatura do solo junto à superfície a uma determinada altura do dia é muito semelhante em dias consecutivos pelo que $T_i \approx T_{i-1}$. No entanto, em determinadas situações, apesar de se considerar um período curto, pode fazer sentido considerar G pois este, por exemplo, em culturas com cobertura total do solo ou na fase final do ciclo (plantas em senescência), pode ser da mesma ordem de grandeza de H e LE respectivamente (Alves, 1995; Cellier *et al.*, 1996).

O método mais utilizado para medir o fluxo de calor sensível para o solo é a utilização de placas de fluxo de calor às quais corresponde uma condutividade térmica conhecida. As placas são geralmente colocadas a uma profundidade não inferior a 10 mm, de forma a reduzir as perturbações das condições de medição. No entanto, também não se pretende colocar a maior profundidade pois quanto mais profunda menos reflete o real fluxo de calor de solo (Mayocchi & Bristow, 1995).

Existem uma série de modelos possíveis de utilizar para estimar G ao longo do dia, o maior problema reside na obtenção de dados de entrada necessários pois são difíceis de medir ou mesmo de estimar. Assim, geralmente para conhecer G admite-se que este corresponde a uma fracção de R_n (Brutsaert, 1982; Clothier *et al.*, 1986):

$$G = 0,3 - 0,5 R_n, \text{ se solo nu} \quad [3.11]$$

$$G = 0,1 R_n, \text{ se solo totalmente coberto}$$

Allen *et al.* (1998) propõem que se considere para um coberto denso de relva uma razão G/R_n de 0,1 durante o dia e de 0,5 durante a noite. No entanto, têm sido realizados estudos que mostram que esta razão varia com diversos factores ao longo do dia como o tipo de solo, o teor de humidade e a densidade de vegetação (Rodrigues, 2011).

3.3. Transferências de calor sensível (H) e de calor latente (LE)

Os gradientes de temperatura e vapor de água são determinantes para a ocorrência de fluxos de calor sensível e calor latente entre a superfície e a atmosfera (Pereira, 2004).

Tanto a transferência de calor sensível como a de calor latente são processos de difusão molecular, pelo que podem ser traduzidos pela lei de Fick (equações [3.12] e [3.13]), em que o fluxo é proporcional a um gradiente de temperatura e de vapor de água, neste caso, respectivamente.

$$H = -\rho_a c_p K_H \frac{\partial T_a(h)}{\partial h} \quad [3.12]$$

$$LE = -\frac{\rho_a c_p}{\gamma} K_V \frac{\partial e_a(h)}{\partial h} \quad [3.13]$$

onde ρ_a é a densidade do ar (kg m^{-3}), c_p a capacidade térmica mássica do ar a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), K_H e K_V são coeficientes de difusão de calor sensível e calor latente ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$), $T_a(h)$ a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e $e_a(h)$ a tensão atual de vapor de água do ar (Pa) à altura h a partir do solo.

Outra forma de descrever estas equações é utilizando a lei de Ohm, que considera que o fluxo vertical de qualquer entidade entre dois níveis resulta do quociente da diferença de concentração desta e a resistência do ar envolvente à transferência (Monteith, 1981), ficando então:

$$H = \rho_a c_p \frac{(T_s - T_a)}{r_{aH}} \quad [3.14]$$

$$LE = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \frac{(e_{as} - e_a)}{r_{aV}} \quad [3.15]$$

sendo T_s , T_a , e_{as} e e_a a temperatura e a pressão atual de vapor de água da superfície e do ar ao nível de referência (h_r) e r_{aH} e r_{aV} a resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e de calor latente (s m^{-1}).

Na aplicação da equação [3.14] a cobertos vegetais, a grandeza T_s é normalmente difícil de obter já que, dada a sua extensão vertical, não é fácil definir a superfície ao contrário do que acontece com a superfície livre de água ou com solo nu. Para além disso, esta equação resulta de equações de transferência aerodinâmica o que permite a substituição da T_s pela temperatura aerodinâmica da superfície T_o (Troufleau *et al.*, 1997). Sendo assim a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$H = \rho_a c_p \frac{(T_o - T_a)}{r_{aH}} \quad [3.16]$$

A temperatura aerodinâmica pode ser determinada pela extrapolação do perfil de temperatura do ar acima do coberto até a um nível de referência. Em suma, os fluxos de calor, sensível e latente, resultam do quociente entre a diferença de temperatura e de vapor de água e a resistência oferecida pelo ar à transferência.

3.4. Medição da Evapotranspiração

Por forma a medir a evapotranspiração (*ET*), desenvolveram-se diversos métodos de medição que podem ser classificados de acordo com a sua abordagem (Quadro 3.1) (Rana & Katerji, 2000).

Quadro 3.1 – Métodos para medição da *ET* (adaptado de Rana e Katerji, 2000).

Abordagens de medição	Métodos de medição
Hidrológicas	Balanço de água no solo
	Lisímetros de pesagem
Micrometeorológicas	Balanço de energia e razão de Bowen
	Método aerodinâmico
	<i>Eddy covariance</i>
A partir da fisiologia das plantas	Fluxo de seiva

3.4.1. Métodos hidrológicos

3.4.1.1. Balanço de água no solo

A *ET* pode ser medida indirectamente pelo balanço de água no solo, num determinado período de tempo e a uma determinada profundidade radicular, como um termo residual (equação [3.17]). Trata-se de uma equação que tem por base o princípio de conservação de massa em que a consideração dos diferentes componentes depende do tamanho e da escala de tempo do sistema de interesse (Kool *et al.*, 2014).

$$\Delta S = P + R + A_c + E_{se} - (D + E_{ss} + ET + E_s) \quad [3.17]$$

onde ΔS corresponde à variação de armazenamento de água no solo, *P* à precipitação, *R* à quantidade de água aplicada através da rega, *A_c* à ascensão capilar, *E_{se}* ao escoamento subsuperficial de entrada no sistema considerado, *D* à água drenada, *E_{ss}* ao escoamento subsuperficial de saída do sistema, *E_s* ao escoamento superficial. A quantidade de água regada geralmente é conhecida, a precipitação pode ser medida com pluviómetros, os restantes componentes devem ser medidos ou estimados.

Geralmente não se justifica considerar todos os termos da equação, seja pela importância relativa ou pela dificuldade na medição.

A extração de água pelas raízes mais profundas, a perturbação do solo que resulta da colocação dos sensores, o facto de a medição do armazenamento ser representativa de uma área geralmente pequena e a não uniformidade das raízes são factores que comprometem a medição da *ET* por este método (Farahani *et al.*, 2007).

3.4.1.2. Lisímetro de pesagem

Trata-se de um processo de medição directo da evapotranspiração que tem sido muito utilizado não só para determinação de coeficientes culturais mas também como meio de comparação e validação de modelos. O sistema de pesagem com um lisímetro consiste num recipiente com solo, instalado em condições de campo com um sistema de pesagem que permite controlar as variações de água com elevada precisão (0,02-0,05 mm água) (Farahani *et al.*, 2007).

As medições da *ET* realizadas a partir deste método podem no entanto ser afetadas por diferenças no solo, na altura e na densidade da vegetação entre o lisímetro e a área em torno deste, bem como em determinadas situações em que a vegetação em torno do lisímetro e da área mais próxima é uma vegetação tipicamente seca ou solo nu, provocando um efeito de oásis. Na área mais seca existe pouca água para que ocorra evapotranspiração provocando um excesso de radiação líquida que é convertida em calor sensível e que por advecção provoca uma sobrestimação da *ET* pelo lisímetro (Rana & Katerji, 2000).

3.4.2. Métodos micrometeorológicos

3.4.2.1. Balanço de energia / razão de Bowen

A evapotranspiração também pode ser determinada através do balanço energético (equação [3.18]), sendo que esta é a fórmula mais utilizada.

$$R_n - G = H + LE \quad [3.18]$$

onde R_n é a radiação líquida ($W\ m^{-2}$), G a densidade de fluxo de calor de ou para o solo ($W\ m^{-2}$), que podem ser medidas directamente por radiómetros e por placas de fluxo de calor, respectivamente, e H é a densidade de fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) e LE a densidade de fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$).

A razão de Bowen (β) que surge em 1926 por Bowen (equação [3.19]) conjugada com o método do balanço energético (equação [3.20]) permite que se determine *ET* através de medições de temperatura e humidade feitas a diferentes alturas do coberto e da medição de R_n e do G .

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad [3.19]$$

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad [3.20]$$

A β pode ser determinada a partir da razão entre a diferença de temperatura (ΔT) e a diferença de pressão de vapor (Δe) entre dois níveis (equação [3.21] e [3.24]) (Alves, 1995 e Rana & Katerji, 2000), considerando que os coeficientes de transporte para o calor sensível e o calor latente são iguais.

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad [3.21]$$

com

$$\Delta e = \Delta[e(T_w)] - \gamma (\Delta T - \Delta T_w) \quad [3.22]$$

onde T_w é a temperatura de bolbo molhado. A partir do conhecimento da β é possível obter ET (equação [3.20]) e H da seguinte forma:

$$H = \frac{\beta (Rn - G)}{1 + \beta} \quad [3.23]$$

A razão de Bowen é um método indirecto de medição da ET . Este método pode introduzir erros na estimativa da ET em situações de cobertos heterogéneos (Alves, 1995) e quando ocorre advecção de calor sensível das zonas em volta (Verma *et al.*, 1978).

3.4.2.2. Método aerodinâmico

A evapotranspiração pode ser medida directamente através do método aerodinâmico (equação [3.24]).

$$LE = -\lambda \rho_a u^* q^* \quad [3.24]$$

onde u^* é a velocidade de atrito ($m s^{-1}$) (equação [3.25]) e q^* a humidade específica do ar ($kg kg^{-1}$) (equação [3.26]).

$$u^* = \frac{k u}{\ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right) - \psi_M} \quad [3.25]$$

$$q^* = \frac{k (q - q_o)}{\ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right) - \psi_V} \quad [3.26]$$

onde $k = 0,41$ é a constante de von Karman, d (m) a altura de deslocação do plano do zero, z_o é o comprimento da rugosidade da superfície, ψ_M é uma função de correcção da estabilidade do transporte da quantidade de movimento, q_o é a humidade do ar ao nível $z = d + z_o$ e ψ_V é uma função de correcção para o transporte de calor latente (Rana & Katerji, 2000).

As funções de correcção da estabilidade são determinadas por processos iterativos (Pieri & Fuchs, 1990). A maior dificuldade deste método prende-se com a medição da humidade do ar nos diferentes níveis acima do coberto, daí que se possa determinar indirectamente o LE pelo balanço

energético (equação [3.18]), desde que o H seja obtido a partir da relação fluxo-gradiente (equação [3.27]).

$$H = -\rho_a c_p u^* T^* \quad [3.27]$$

onde T^* é determinada pelo perfil de temperatura do ar da seguinte forma:

$$T^* = \frac{k(T - T_o)}{\ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right) - \psi_H} \quad [3.28]$$

onde T_o é a temperatura medida no nível z e ψ_H uma função de correcção do transporte de calor sensível. A precisão desta técnica depende do número de níveis de medição da velocidade do vento e de temperatura, apesar de ter como vantagem não necessitar de medições de humidade (Rana & Katerji, 2000).

Itier (1981) propôs uma simplificação deste método considerando apenas dois níveis para a medição da velocidade do vento Δu e para a temperatura ΔT , que mostrou bons resultados quando aplicado a uma cultura de soja na região Sul de Itália.

3.4.2.3. Método das flutuações instantâneas

O método das flutuações instantâneas, mais conhecido como “*eddy covariance*” é uma técnica que pressupõe uma medida muito precisa de elevada frequência (10-20 Hz), com sensores que permitam obter as componentes da velocidade do vento, a temperatura e o vapor de água para a determinação da ET da seguinte forma (Kool *et al.*, 2014):

$$ET = \rho_a \overline{w' q'} \quad [3.29]$$

com ET em $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $\overline{w' q'}$ é a média da covariância entre a componente vertical da velocidade do vento e a humidade específica (w' em m s^{-1} e q' em kg kg^{-1}). As medições das flutuações do vento verticalmente podem ser feitas com um anemómetro sónico. Para que este método possa ser usado para determinar directamente a ET , estas variáveis têm de ser medidas ao mesmo tempo que a concentração de vapor, que pode ser obtida com um higrómetro (Kool *et al.*, 2014).

Este método apresenta, ainda assim, alguns inconvenientes tais como a utilização de higrómetros que são muito sensíveis, consideravelmente dispendiosos e exigentes em manutenção, e ainda a dificuldade de montagem do sistema (Rana & Katerji, 2000). Assim, a utilização deste método justifica-se em situações de investigação e tem possibilitado um maior conhecimento no que diz respeito aos coeficientes de difusão turbulenta (Gama, 1987).

3.4.3. Método do fluxo de seiva

O método do fluxo de seiva inclui duas abordagens diferentes, uma com a utilização de impulsos de calor e outra fazendo um balanço de calor. Cohen *et al.* (1994), dentro da primeira abordagem, desenvolveram uma metodologia que consiste na determinação da densidade de fluxo de seiva a partir do intervalo de tempo necessário para atingir uma temperatura máxima, num sensor colocado a uma certa distância na direcção de deslocamento do fluxo após a libertação de um impulso de calor (Conceição, 2011).

O método mais utilizado é o do balanço de calor, que se baseia na aplicação de calor num determinado volume de caule, e no balanço energético desse volume para calcular o fluxo de seiva como um termo residual (Conceição, 2011). Pressupõe-se e assume-se que a diferença entre o calor aplicado e o calor que restar se deva a processos de convecção, o que pode ser relacionado directamente com o fluxo de água (Rana & Katerji, 2000).

3.5. Modelação da Evapotranspiração

Na maior parte das situações em que se pretende conhecer a *ET*, não existem instrumentos ou os recursos necessários para a medir efectivamente, o que conduz à utilização de modelos para a estimar (Farahani *et al.*, 2007). Geralmente recorre-se a métodos de medição da *ET* em investigação, e métodos de estimação em situações práticas de regadio (Pereira, 2004).

A evolução dos modelos deu-se em duas fases, a primeira aplicada a uma superfície homogénea e a segunda considerando que, para uma cultura esparsa, a transpiração e a evaporação sejam determinadas separadamente (Lagos *et al.*, 2009).

3.5.1. Modelação em cobertos contínuos

Penman (1948) inicialmente propôs a partição da radiação líquida em fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente para uma superfície homogénea de referência. A equação proposta resulta da combinação de dois termos, um que tem em conta a energia necessária para a evaporação e o outro a capacidade de saída de vapor de água para a atmosfera.

O modelo utiliza uma função empírica da velocidade do vento e uma para estimar a radiação a partir da insolação e assume que a *ET* é apenas influenciada por factores meteorológicos. No sentido de contornar estas limitações, Monteith (1965) propôs uma adaptação de forma a considerar factores de controlo do próprio coberto que afectam inevitavelmente a transpiração. O primeiro desafio consistiu em considerar a cultura, que é um sistema tri-dimensional, em uni-dimensional, designado de “grande folha”, e depois assumir os seguintes pressupostos: o coberto vegetal é uma superfície homogénea e extensa, existe uma superfície fictícia saturada à mesma temperatura da superfície de referência do coberto, uma resistência adicional à transferência de calor latente e as resistências aerodinâmicas para a transferência de calor latente e calor sensível são iguais ($r_{aH} = r_{aV} = r_a$) (Alves, 1995). Assim obtém-se a conhecida equação de Penman-Monteith (equação [3.30]).

$$LE = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad [3.30]$$

onde Δ representa o declive da curva de pressão de vapor saturante ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_s a pressão de vapor saturante do ar (kPa), e_a a pressão atual de vapor do ar (kPa), r_a a resistência aerodinâmica (s m^{-1}) e r_c a resistência do coberto (s m^{-1}). Como todos os elementos que compõem a superfície do coberto são tratados como se de um se tratasse este modelo é também denominado de modelo mono-camada (“one layer”) (Rodrigues, 2011).

A resistência do coberto resulta da combinação da resistência estomática de todas as folhas, da resistência do solo à evaporação e da resistência à difusão de vapor de água no interior do coberto (Perez *et al.*, 2006) e inclui não só uma componente fisiológica mas também uma componente de resistência aerodinâmica (Alves & Pereira, 2000). Assim, a sua determinação torna-se exigente, e consiste numa das principais limitações desta equação, bem como o facto de se tratar de uma aproximação mono-camada e por isso se adequar melhor a cobertos contínuos que cobrem a totalidade do terreno (Alves, 1995).

3.5.2. Modelação em cobertos descontínuos

O modelo de uma camada não é facilmente adaptável às culturas de coberto parcial pois tanto o substrato/solo como a vegetação afetam o fluxo de calor sensível e calor latente bem como todo o balanço energético. Para além disso tratam-se de culturas em que a vegetação não está aleatoriamente distribuída, encontrando-se na maior parte das vezes em linhas (Kustas, 1990).

Em consequência de nas culturas esparsas o conceito de *big leaf* não se adequar, os modelos de estimação da *ET* desenvolveram-se no sentido de separar a evaporação da transpiração (modelos multi-camada), ou seja considerar o sistema solo-vegetação como um sistema bipartido, em que os fluxos energéticos são separados entre os fluxos de solo/substrato e os da vegetação (Lagos *et al.*, 2009, Norman *et al.*, 1995). Com base neste pressuposto tem-se que a radiação líquida do coberto vegetal resulta da soma do balanço da radiação da respectiva vegetação (R_{nc}) e do balanço da radiação do solo/ substrato (R_{ns}) (equação [3.4]).

Admitindo a separação das camadas solo-vegetação, cada uma delas tem o seu respectivo balanço (equações [3.31] e [3.32]).

$$R_{nc} = H_c + LE_c \quad [3.31]$$

$$R_{ns} = G + H_s + LE_s \quad [3.32]$$

onde H_c é o fluxo de calor sensível da vegetação, H_s o fluxo de calor sensível do solo/substrato, LE_c o fluxo de calor latente a partir da vegetação, LE_s o fluxo de calor latente do solo/substrato.

Shuttleworth e Wallace (1985) desenvolveram um modelo com base no pressuposto já referido, usando resistências de superfície para regular as transferências de calor e massa das plantas e do solo

e a resistência aerodinâmica para controlar os fluxos da atmosfera (Lagos *et al.*, 2009). As resistências consideradas são a resistência estomática do coberto (r_s^c), a resistência à evaporação de água da superfície do solo (r_s^s), a resistência ao fluxo desde a folha até à camada de ar dentro do coberto (r_a^c), a resistência ao fluxo no interior do coberto (r_a^s) e a resistência aerodinâmica (r_a) que ocorre entre o nível médio do fluxo de transporte e a altura de referência (Figura 3.1) (Alves, 1995).

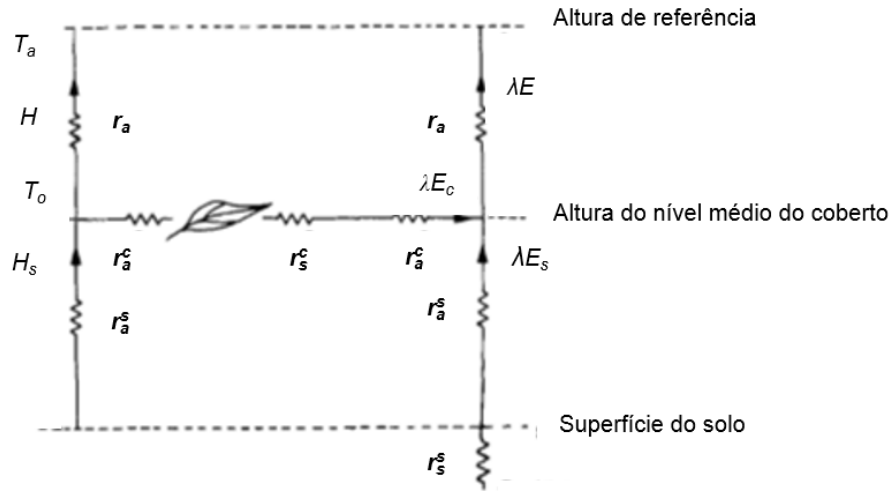


Figura 3.1 - Diagrama das resistências aos fluxos no modelo para culturas esparsas (adaptado de Shuttleworth & Wallace, 1985).

O modelo surge a partir da soma da transpiração da cultura e da evaporação de água do solo, ambos expressos a partir das equações do tipo Penman-Monteith (Shuttleworth & Wallace, 1985).

3.6. Resistências aos fluxos

3.6.1. Resistência aerodinâmica para a transferência da quantidade de movimento

3.6.1.1. Considerações gerais

Quando uma corrente de ar passa numa superfície, as suas características induzem fluxos ascendentes de quantidade de movimento, o que conduz a uma diminuição da velocidade tanto maior quanto maior a proximidade da superfície (Rodrigues, 2011). É a transferência da quantidade de movimento que determina os processos de transferência de calor sensível e de calor latente, que por sua vez afectam os coeficientes de transferência turbulenta de calor e vapor (Pereira, 2004).

Segundo a teoria de Monin-Obukhov, o perfil de velocidade do vento ao longo de um coberto vegetal homogêneo e horizontal é dado pela seguinte expressão (Lui *et al.*, 2007):

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) - \psi_M \right] \quad [3.33]$$

onde $u(z)$ é a velocidade do vento à altura z acima da superfície. A capacidade do coberto em absorver a quantidade de movimento é nos dada pelo z_o , o comprimento da rugosidade aerodinâmica da superfície, e d representa o nível médio ao qual a quantidade de movimento é absorvida (Alves, 1995). Utilizando mais uma vez a analogia da lei de Ohm, e perante condições de neutralidade, é possível determinar a quantidade de movimento (f) bem como a resistência aerodinâmica à quantidade de movimento (r_{aM}) conjugando as equações [3.33] e [3.34]:

$$f = \rho_a u^*{}^2 = \frac{\rho_a u(z)}{r_{aM}} \quad [3.34]$$

$$r_{aM} = \frac{[\ln((z - d) / z_o)]^2}{k^2 u(z)} \quad [3.35]$$

Quanto maior z_o , mais rugosa é a superfície e quanto maior a velocidade do vento menor a r_{aM} , ou seja, as trocas são efectuadas mais facilmente. No entanto, a neutralidade térmica nem sempre se verifica. Efetivamente, quando ocorre turbulência, existe uma maior mistura de ar quente e ar frio, o que conduz a gradientes verticais inferiores. Para permitir o cálculo da r_{aM} , mesmo em condições estáveis ou instáveis, é necessário acrescentar uma função de estabilidade para a quantidade de movimento, a ψ_M , como já referida. De igual forma para os outros fluxos, nomeadamente de calor sensível e latente, é necessário considerar as funções de estabilidade ψ_H e ψ_V , respectivamente (Alves, 1995).

Para avaliar a estabilidade da atmosfera pode-se recorrer ao número de Richardson (Ri), que se pode calcular da seguinte forma (Alves *et al.*, 2000):

$$Ri = \frac{g (t_1 - t_2)}{\bar{T}} \frac{z_1 - z_2}{u_1^2 - u_2^2} \quad [3.36]$$

onde g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$), \bar{T} é a média da temperatura absoluta (K) medida entre o nível z_1 e z_2 da atmosfera (m) nos quais as velocidades do vento ($m\ s^{-1}$) u_1 e u_2 e as temperaturas do ar ($^{\circ}C$) t_1 e t_2 são medidas.

As funções de estabilidade podem ser determinadas a partir do Ri , sendo que as expressões propostas por Dyer (1974) são:

$$\begin{cases} \psi_M = (1 - 16 Ri)^{-1/4}, & \text{se } Ri < -0.1 \text{ (condições instáveis)} \\ \psi_{H,V} = (1 - 16 Ri)^{-1/2}, & \text{se } Ri < -0.1 \text{ (condições instáveis)} \\ \psi_{H,V} = \psi_M = (1 - 5 Ri)^{-1}, & \text{se } -0.1 \leq Ri \leq 1 \text{ (condições estáveis)} \end{cases} \quad [3.37]$$

Em suma, considerando que nem sempre se verificam as condições de neutralidade a forma mais generalizada para o cálculo da r_{aM} é a seguinte:

$$r_{aM} = \frac{[\ln((z - d) / z_o) - \psi_M]^2}{k^2 u(z)} \quad [3.38]$$

3.6.1.2. Determinação dos parâmetros d e z_o

Para a determinação experimental dos parâmetros d e z_o são feitas medições rigorosas do vento a várias alturas, e de seguida passa-se um processo de tentativas. Face a condições de estabilidade térmica tem-se:

$$\ln(z - d) = \ln(z_o) + \left(\frac{k}{u^*}\right) u \quad [3.39]$$

A equação [3.39] aparece como uma recta do tipo $y = a + bx$. Testam-se vários valores de d dentro de uma gama, e retém-se o valor que conduz a um maior coeficiente de correlação. O parâmetro z_o obtém-se a partir da ordenada na origem da recta e u^* a partir do seu declive. Este método tem como desvantagem a determinação dos dois parâmetros não ser independente, o que faz com que qualquer variação em z_o seja devida a uma variação de d (Alves, 1995).

Diversos autores propõem a estimativa destes parâmetros relacionando-os com a altura do coberto. No entanto, as relações encontradas só têm aplicabilidade a cobertos uniformes e completamente desenvolvidos. À medida que a planta se desenvolve, existe um crescimento da área foliar, o que faz com que os parâmetros aerodinâmicos se alterem ao longo do ciclo vegetativo da cultura. Shaw e Pereira (1982) afirmam que d é uma função monótona crescente da densidade de vegetação e que z_o aumenta inicialmente com a densidade atingindo um pico mas que logo de seguida decresce. Para além disso, a estrutura do coberto também condiciona, na medida em que as culturas cujas folhas se encontram maioritariamente no topo do coberto são menos rugosas aerodinamicamente do que aquelas em que as folhas se concentram sobretudo na parte inferior do coberto, tendo o mesmo LAI (Alves, 1995).

3.6.2. Resistência aerodinâmica aos fluxos de calor

Alves (1995) afirma que quando não existe advecção das áreas vizinhas pode-se assumir que $r_{aH} = r_{aV}$, mesmo sob condições de instabilidade. Já a igualdade: $r_{aH} = r_{aV} = r_{aM}$, levanta dúvidas, pois a natureza dos processos de transferência são diferentes. A transferência de calor sensível, latente ou de quantidade de movimento acontecem por difusão causada pela existência de gradientes, no entanto a transferência de quantidade de movimento também ocorre devido a forças de pressão desenvolvidas pela superfície (efeito “*bluff body effects*”) e que desaceleram o fluido.

Assim, a $r_{aM} < r_{aH}$, r_{aV} , e para reformular a igualdade deve ser adicionada uma resistência adicional (r_b) (Owen & Thomson, 1963):

$$r_{aH} = r_{aV} = r_{aM} + r_b \quad [3.40]$$

$$r_b = \frac{B^{-1}}{u^*} \quad [3.41]$$

$$B^{-1} = 1.35 u^{*1/3} \quad [3.42]$$

onde B é o número de Stanton e u^* deve ser em cm s^{-1} .

Portanto, em condições de neutralidade térmica e de estabilidade/instabilidade, as expressões que, conjugando a equação [3.35] com a [3.38], permitem calcular a resistência ao transporte de vapor ou de calor sensível são as seguintes respectivamente:

$$r_{aV,H} = \frac{\ln[(z-d)/z_{oH,V}] \ln[(z-d)/z_o]}{k^2 u(z)} \quad [3.43]$$

$$r_{aV,H} = \frac{\{\ln[(z-d)/z_{oH,V}] - \psi_{H,V}\} \{\ln[(z-d)/z_o] - \psi_M\}}{k^2 u(z)} \quad [3.44]$$

onde $z_{oH,V}$ é a rugosidade da superfície relativamente ao calor sensível e latente. Alves *et al.* (2000) propõem calcular r_a a partir do topo do coberto (h_c) e não do nível $d + z_o$ como era assumido nas equações anteriores. Teremos então:

$$r_a = \frac{\ln[(z-d)/(h_c-d)] \ln[(z-d)/z_o]}{k^2 u(z)} \quad [3.45]$$

A resistência ao fluxo de calor sensível depende assim da velocidade do vento, da rugosidade da superfície e das condições de estabilidade da atmosfera (Brutsaert, 1982).

3.7. Resistência do coberto (r_c)

A resistência da superfície (r_c) não é um parâmetro exclusivamente fisiológico, no entanto é comum assumir-se que depende maioritariamente da resposta estomática (Alves *et al.*, 1998). Assume-se que a resistência do coberto (r_c) é uma medida que engloba as resistências estomáticas do coberto e que estas actuam em paralelo, por isso pode-se fazer uma analogia com os circuitos eléctricos e “pesá-la” pelo LAI (Monteith, 1973) (equações [3.46] e [3.47]).

$$r_c = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{st_i}}\right)^{-1}}{LAI} \quad [3.46]$$

$$r_c = \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{r_{st_i} / LAI}\right)^{-1} \quad [3.47]$$

onde r_{st} é a resistência estomática ($s\ m^{-1}$), n é o número de folhas, e m o número de camadas.

Por ser uma resistência algo complexa, vários têm sido os estudos para determinar a r_c , assentes nos factores que interferem na sua função. Factores tais como a radiação, temperatura, défice de pressão de vapor, factores relacionados com os processos fisiológicos da transpiração, com os estomas e com o solo como o potencial de água no solo, a idade da folha, situações de *stress* da planta anteriores e a posição da folha têm sido analisados, uns com maior grau de dificuldade na medição (Alves e Pereira, 2000).

O estudo dos factores que afectam a r_c permitiu o desenvolvimento de diversas funções que utilizam não a própria resistência mas a condutância estomática g_{st} ($= 1/r_{st}$) por tomar apenas valores entre 0 e 1 quando a r_c é elevada (condições de stress hídrico que provocam o fecho dos estomas) e muito baixa (condições óptimas) respectivamente. A interação entre estes é muito diversa, pois muitos factores não são independentes, sendo que a forma mais simples de abordar o assunto é considerar uma regressão múltipla com variáveis independentes (exemplo de equação [3.48]) (Alves e Pereira, 2000).

$$g_{st} = a_1 + a_2 R + a_3 D + a_4 T + \dots \quad [3.48]$$

Jarvis (1976) propôs considerar as variáveis independentes mas com um efeito multiplicativo (exemplo de equação [3.49]). As funções g são determinadas em estudos feitos em ambiente controlado.

$$g_{st} = g_{max} g(R) g(T) g(D) g(\psi) \dots \quad [3.49]$$

Outra abordagem para a determinação da r_c tem sido considerar a média nos diferentes níveis do coberto sobre o LAI , o que tem demonstrado bons resultados em superfícies muito heterogéneas como florestas e também em culturas esparsas com solo seco.

Em culturas agrícolas de coberto completo a taxa de transpiração é pouco sensível à r_c , apresentando uma r_a elevada pois têm geralmente uma superfície pouco rugosa. A sua pouca sensibilidade deve-se ao facto de haver pouca mistura de ar dentro do coberto o que faz com que tenha características diferentes da própria atmosfera, como por exemplo um maior teor de humidade do ar dentro do coberto face à própria transpiração. Quando ocorre o fecho dos estomas, reduz-se o DPV que terá tendência a aumentar restabelecendo a taxa de transpiração. Este facto, mostra que os estomas não demonstram ter um grande efeito sobre a ET , quando não se encontram fechados. Já em culturas com uma superfície heterogénea e que apresentam uma superfície rugosa a abertura estomática tem maior relevância (Alves, 1995).

Assim, na prática a r_c é normalmente calculada como um termo residual da equação de Penman-Monteith (equação [3.50]) (Alves e Pereira, 2000).

$$r_c = r_a \left(\frac{\Delta}{\gamma} \beta - 1 \right) + \frac{\rho_a c_p DPV}{\gamma LE} \quad [3.50]$$

No caso de culturas de coberto completo em que o solo está húmido a média da resistência estomática afasta-se dos valores obtidos da r_c pela equação [3.50]. A diferença encontrada deve-se ao facto de nem todas as folhas do coberto contribuírem para a evapotranspiração, chamada de área foliar efectiva, ou seja, são as folhas do topo do coberto, as mais iluminadas, que contribuem para a maior parte da transpiração. Na verdade a abordagem considerada nas equações [3.46] e [3.47] só é possível em situações em que o DPV ao nível de cada folha é o mesmo, ou seja, no caso de culturas de cobertos parciais em que o seu gradiente é muito pequeno dentro do coberto (Alves, 1998, Alves e Pereira, 2000).

Considerando a equação [3.20] e [3.50] r_c fica:

$$r_c = r_a \left(\frac{\Delta}{\gamma} \beta - 1 \right) + (1 + \beta) \frac{\rho_a c_p DPV}{\gamma (R_n - G)} \quad [3.51]$$

Trata-se da forma mais utilizada para determinar r_c a partir de dados de variáveis meteorológicas mais comuns (equação [3.51]) (Alves e Pereira, 2000). Pode-se pensar nesta resistência como uma medida de controlo por parte da vegetação no processo de evaporação, ou seja, pode ser um indicador do stress hídrico da cultura. Em condições de stress hídrico é de esperar uma maior resistência da planta à transpiração. Nesse sentido, têm sido realizados estudos no sentido de utilizar a resistência do coberto estimada a partir de dados meteorológicos e a temperatura radiativa da superfície, medida a partir de termómetros de infravermelhos para determinar o stress hídrico das culturas (Shuttleworth e Gurney, 1990).

3.8. Determinação do fluxo de calor sensível a partir da temperatura radiativa da superfície

O fluxo de calor sensível pode ser expresso por uma diferença de temperaturas (equação [3.16]), a temperatura aerodinâmica da superfície (T_o) e a temperatura do ar medido a uma altura de referência (T_a), geralmente a altura à qual são feitas as medições das variáveis meteorológicas. A temperatura aerodinâmica da superfície determina a perda de calor sensível. No entanto, é difícil de medir pelo que o desenvolvimento de sensores térmicos, dos quais se obtém a temperatura radiativa da superfície, têm permitido a realização de diversos estudos para encontrar a melhor forma de substituir a T_o pela T_r na determinação do fluxo de calor sensível.

A sua equivalência é dificilmente assegurada devido à enorme variação da orientação dos diferentes elementos do coberto, que são submetidos a diferentes quantidades de radiação e velocidades de vento (Huband & Monteith, 1986). Num ensaio feito a uma cultura de trigo, mostrou-se que T_o é geralmente menor sob condições atmosféricas estáveis do que T_r e maior em condições instáveis (Choudhury *et al.*, 1986). A diferença entre ambas pode rondar os 2 °C numa cultura de coberto completo e os 10 °C numa cultura de coberto parcial (Kustas & Norman, 1996). Estas diferenças entre a T_r e a T_o impossibilitam apenas a substituição da T_o pela T_r na equação de fluxo de calor

sensível. No entanto, a utilização da T_r para estimar a ET é um método atractivo pois é um processo de obtenção de dados simples e permite obter uma média espacial do comportamento da cultura (Shuttleworth e Gurney, 1990).

Utilizar a T_r registada no termómetro de infravermelhos pressupõe que esta seja representativa da temperatura da superfície em estudo (Figura 3.2) admitindo que a diferença desta para a T_a é proporcional à taxa vertical do transporte turbulento do calor sensível, sob as mesmas condições atmosféricas (Kustas *et al.*, 1990).

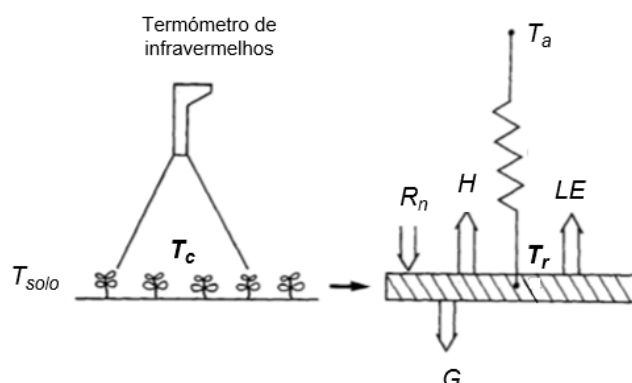


Figura 3.2 - Esquema ilustrativo de um modelo de uma camada, evidenciando a posição do sensor e a temperatura compósita captada, pois inclui a temperatura do solo (T_{solo}) e a temperatura do coberto (T_c) (adaptado de Kustas, 1990).

O ângulo de visão do sensor, a geometria e o perfil de temperatura do coberto têm sido apontados como factores que afectam significativamente o valor de temperatura obtido (Huband & Monteith, 1986). Existem igualmente factores ambientais que afectam a T_r obtida pelo sensor, como o aumento da velocidade do vento, que conduz à diminuição da resistência aerodinâmica e consequente aumento do fluxo de calor sensível e a presença de nuvens que ao diminuir a radiação leva igualmente a uma diminuição elevada da T_r , tal variação ainda é acrescida em situações de *stress* hídrico. O maior problema nestas situações está no tempo que o sensor demora a voltar a registar uma temperatura próxima da temperatura real do coberto, veja-se o caso de uma cultura de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], em que a diminuição da radiação solar de 975 para 350 W m⁻² provocou a descida da T_r em 4 °C e o sensor demorou cerca de 1 a 2 minutos a registar novamente uma temperatura próxima da real (Stone *et al.*, 1975). Em determinadas culturas ainda é mais preocupante na medida em que num estudo feito na Califórnia a uma vinha [*Vitis spp.*], após a passagem de nuvens o sensor demorou 10 minutos a obter uma temperatura estável (*“steady state temperature”*). Assim, é importante ter em consideração que existem alguns cuidados a ter na utilização do termómetro de infra-vermelhos, sobretudo quando ocorrem mudanças rápidas no nível de radiação solar derivadas da passagem de nuvens (Gardner *et al.*, 1992).

O desenvolvimento destes sensores que nos permitem conhecer a temperatura radiativa do coberto fez com que se desenvolvessem uma série de estudos no sentido de utilizá-la na determinação da ET , com a sua inclusão no cálculo do fluxo de calor sensível, quer por encontro de uma relação com

a T_o , quer por adição de outras variáveis à equação, uma vez que considerar $T_r = T_o$, não se mostrou eficaz em muitos dos estudos feitos, sobretudo em cobertos descontínuos.

Uma vez que, em condições de instabilidade, T_r é geralmente superior a T_o , Stewart *et al.* (1994), propõem considerar-se uma resistência aerodinâmica por excesso (r_h) que resulta da soma da resistência aerodinâmica ao fluxo de calor sensível e de uma resistência adicional radiativa (r_r), ficando:

$$H = \rho_a c_p \frac{(T_r - T_a)}{r_h} \quad [3.52]$$

$$r_h = r_{aH} + r_r \quad [3.53]$$

$$r_r = \frac{B^{-1}}{u^*}, \text{ com } kB^{-1} = \ln \left(\frac{z_o}{z_{oH}} \right) \quad [3.54]$$

onde a resistência adicional radiativa (r_r) se determina com base no número de Stanton (B) e na velocidade de atrito, tal como a resistência adicional r_b já referida anteriormente (equação [3.41]). No entanto, enquanto a última surge para compensar a diferença entre a resistência aerodinâmica ao fluxo de calor sensível e a resistência aerodinâmica à transferência de quantidade de movimento ($r_{aH} > r_{aM}$), a r_r advém da diferença entre T_r e T_o , pelo que há autores que propõem considerar notações distintas, por se tratarem de parâmetros de ajustamento (Troufleur *et al.*, 1997; Rodrigues, 2011).

Na Califórnia foi realizado um estudo em oito regiões semi-áridas, onde se identificou que a quantidade kB^{-1} variava entre 3,8 e 12,4, e que a utilização destes valores para determinar a resistência adicional radiativa provocava uma redução maior na diferença entre o H medido e o H estimado pela equação [3.52] do que entre o H medido e o H estimado pela equação [3.16], utilizando a igualdade de $T_r = T_o$. Da mesma forma mostraram que a omissão desta resistência conduzia a uma sobrestimação do H nas regiões áridas (Stewart *et al.*, 1994).

Troufleur *et al.* (1997) propõem, tal como se substitui a T_o pela T_r , substituir o kB^{-1} pelo kB_r^{-1} (factor radiométrico), que resulta da conjugação das equações [3.52], [3.53] e [3.41]. Obtém-se então:

$$kB_r^{-1} = k u^* \left(\rho_a c_p \frac{T_r - T_a}{H} - r_{aH} \right) \quad [3.55]$$

Num estudo feito na Califórnia, para uma cultura esparsa e utilizando a equação [3.55], Kustas *et al.* (1989) observaram que o kB_r^{-1} variava entre 1 e 10, e que podia ser descrito em função da diferença entre T_r e T_a e da velocidade do vento, ficando então a seguinte relação empírica:

$$kB_r^{-1} = a u (T_r - T_a) \quad [3.56]$$

onde a é uma constante de calibração inicialmente com o valor determinado de 0,17 e em estudos posteriores de 0,13 e u a velocidade do vento medida á altura de referência (Troufleur *et al.*, 1997).

Lhomme *et al.* (1997), partindo do modelo de Shuttleworth & Wallace (1985) e ainda do pressuposto da linearidade da T_r , determinaram uma expressão analítica para o kB_r^{-1} , onde reconheceram que este parâmetro varia não só com características estruturais como o LAI , a altura da vegetação e o grau de cobertura do solo mas também em função do nível de *stress* hídrico e das condições meteorológicas, como o vento, a radiação líquida e o DPV . Este resultado mostra que o modelo seguido, utilizando o kB_r^{-1} não é o mais apropriado para permitir a utilização da T_r no cálculo do H em cobertos descontínuos, devido à enorme variabilidade. Em suma, considerando diversos estudos feitos utilizando o kB^{-1} , verificou-se que este parâmetro torna-se difícil de estimar para uma cultura esparsa, o que faz com que se tenha procurado outras alternativas.

Uma outra abordagem que Troufleur *et al.* (1997) propuseram foi considerar que a equação [3.16] podia ser rescrita da seguinte forma:

$$H = \rho_a c_p \frac{(T_r - T_a) - (T_r - T_o)}{r_a} \quad [3.57]$$

As diferenças relativas de temperatura foram analisadas com base numa relação linear, com os coeficientes α_1 e α_2 da seguinte forma:

$$T_r - T_o = f(T_r - T_a) = \alpha_1 (T_r - T_a) + \alpha_2 \quad [3.58]$$

A relação entre $(T_r - T_o)$ e $(T_r - T_a)$ é possível de ser estimada com maior precisão do que o factor kB^{-1} , pois depende apenas de parâmetros estruturais. Assim H pode ser estimado por:

$$H = \rho_a c_p \frac{(1 - \alpha_1)(T_r - T_a) - \alpha_2}{r_a} \quad [3.59]$$

Quando aplicada esta equação às condições de uma cultura de milho, obteve-se um coeficiente de determinação de 0,97 e ainda uma estimativa da raiz do quadrado médio dos resíduos entre os H estimados e os observados expresso em $W m^{-2}$ de 48 e de 95 com a abordagem da equação [3.56].

Outros modelos foram desenvolvidos tendo por base a temperatura radiativa do solo/substrato e a temperatura radiativa da vegetação, aplicando o método do modelo de Shuttleworth & Wallace (1985), em casos em que a temperatura radiativa do coberto não integre em si as duas componentes. Como na maioria das situações a medição não é feita separadamente foram desenvolvidos métodos para contornar este problema, recorrendo à média ponderada e a coeficientes de ajustamento específicos para as condições de ensaio (Lhomme & Monteny, 1993; Norman *et al.*, 1995).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização do local de ensaio

O ensaio foi feito em 1997 na Estação Experimental António Teixeira (pertencente ao Departamento de Regadio do INIA), em Coruche com as seguintes coordenadas geográficas 38° 57'N, 8°32' W e 30 m de altitude. O local encontra-se situado dentro do perímetro de rega do Vale do Sorraia

Para este estudo apenas foram considerados os dados obtidos numa (parcela 27) das muitas parcelas da Estação Experimental, com aproximadamente 1 ha de área cultivada.

Em termos de caracterização climática, Gama (1987) refere que, no Verão, o local está sob influência do anticiclone subtropical dos Açores que provoca tempo seco e quente. Com a descida do anticiclone para Sul, o que ocorre nas outras estações do ano, o local fica sujeito a ventos variáveis provenientes de Oeste que acabam por provocar tempo chuvoso e instável.

As condições climáticas da região enquadram-se no clima mediterrânico, como tal as temperaturas mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento vegetativo das culturas verificam-se na estação seca. No Verão às elevadas temperaturas não correspondem precipitações elevadas nem intensas, como de resto não se verifica na generalidade das zonas com o mesmo clima. A precipitação que ocorre normalmente não compensa a evapotranspiração das culturas (Gama, 1987).

Segundo a bibliografia, o solo onde foi realizado o ensaio tem textura arenosa e baixo teor em matéria orgânica. Para além disso, a toalha freática não exerce nenhuma influência no solo. Ainda é caracterizado por apresentar uma elevada proporção de areia grossa (diâmetro das partículas compreendido entre 0.2 mm e 2 mm) e a presença de uma camada de elementos grosseiros (> 2 mm) a uma profundidade de 40-50 cm (Dias, 1997).

4.2. Descrição do ensaio

A atividade experimental consistiu em medir a temperatura radiativa de duas culturas, entre outras variáveis climáticas, com cobertos de características diferentes: uma cultura que forma um coberto contínuo, homogéneo, cobrindo todo o solo, a alface (*Lactuca sativa* var. *capitata*), e a cultura do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) que tem um coberto parcial, pois as plantas são dispostas em linhas com um intervalo entre ambas em que o solo se encontra nu.

4.2.1. Alface

A alface (*Lactuca sativa* var. *capitata*) tem uma duração do seu ciclo vegetativo de cerca de 50 a 60 dias, as temperaturas ideais para o crescimento e desenvolvimento são entre os 15 a 25 °C. Caracteriza-se pelo seu sistema radicular aprumado e relativamente superficial, com uma profundidade de enraizamento de cerca de 30 cm (Almeida, 2006).

Os dados utilizados para este estudo respectivos à cultura da alface foram obtidos num ensaio realizado na Estação Experimental António Teixeira, em Coruche, em 1992. A cultura foi instalada a 28

de Maio, com uma densidade de plantação de 8 plantas/ m², quando a alface tinha em média 3 a 4 folhas. Em relação ao plano de fertilização, este consistiu em uma adubação de fundo a fornecer K₂O e P₂O₅ antes da instalação e duas coberturas de N ao longo do ciclo vegetativo (Alves, 1995).

Em termos de tratamentos fitossanitários apenas foi aplicado um tratamento insecticida contra a lagarta. Já em relação às infestantes da cultura, estas foram controladas manualmente.

Tendo em conta que o solo é arenoso justifica-se uma rega localizada. No ensaio foi esse o sistema escolhido, cujas principais características foram as seguintes: a existência de uma estação de bombagem, da qual parte uma conduta principal que transporta a água para um ramal com cerca de 45 m situado na cabeceira que transportava toda a água para a parcela, de onde partiam rampas em PVC, com um espaçamento de 75 cm, de diâmetro externo de 17 mm e interno de 14.6 mm, com cerca de 100 a 120 m de comprimento. Nas rampas encontravam-se os gotejadores espaçados de 50 cm, com um caudal nominal de 3.5 L/h. Este sistema de rega encontra-se descrito com maior pormenor em Pêgo (1993).

4.2.2. Tomate

O tomate é originário da costa ocidental da América do Sul, caracterizada por temperaturas moderadas durante a fase de crescimento da cultura, o que faz com que o tomate se adapte a uma gama de temperaturas bastante alargada, entre 10 °C e 30 °C. É uma planta perene mas que é cultivada como anual em Portugal, podendo o seu ciclo vegetativo durar até aos 3 meses (Almeida, 2006).

A cultura foi semeada em estufins em Fevereiro e transplantada para a zona de ensaio em Abril. No final de Maio iniciou a fase da floração, que se intensificou em Junho e que se prolongou até Setembro. As colheitas iniciaram-se a partir de Julho, para consumo em fresco e para produção industrial. Os dados do ensaio foram registados a partir da fase de maior procura evapotranspirativa, ou seja, em plena fase de floração, no dia 173 do ano.

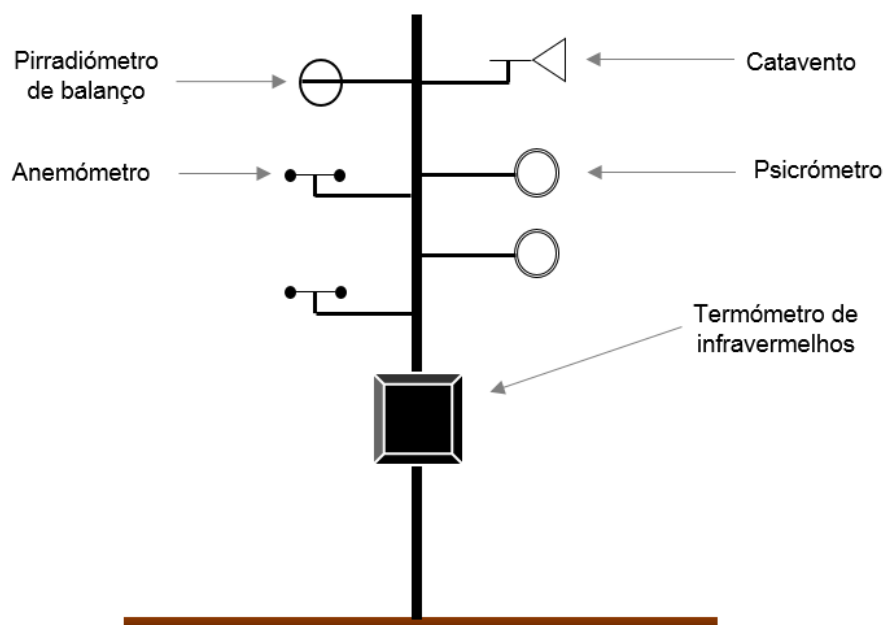
Em termos do sistema de rega, este foi feito nos mesmos moldes que o sistema usado na alface referido no ponto anterior, sendo que o espaçamento entre rampas foi de 1,5 m.

4.3. Medição das variáveis meteorológicas e da temperatura radiativa

Na medição das variáveis registaram-se os valores médios correspondentes a intervalos de 10 minutos por um sistema de aquisição de dados do modelo 21X da Campbell Scientific. Para a medição das variáveis meteorológicas foram utilizados diversos aparelhos (Quadro 4.1), dispostos de acordo com a Figura 4.1.

Quadro 4.1 – Instrumentação para medição das variáveis meteorológicas.

Variáveis meteorológicas	Sensores	Altura do sensor ao solo (m)	Modelo/ Fabricante
Balanço da radiação	Pirradiómetro de balanço	1.8 ^a 1.5 ^b	<i>Schenk</i>
Velocidade do vento	2 anemómetros	1.03 e 1.56 ^a	<i>Young</i>
Temperatura do ar e temperatura do bolbo molhado	2 psicrómetros	1.10 e 1.68 ^a 0.85 e 1.46 ^b	
Temperatura radiativa	Termómetro de infravermelhos		<i>AGEMA</i>
Direcção do vento	Catavento	1.8	<i>Vector Instruments</i>

^a cultura tomate^b cultura alface**Figura 4.1** – Esquema da instrumentação usada no ensaio da alface e do tomate.

O funcionamento dos diferentes aparelhos foi verificado antes da instalação do equipamento no terreno. O pirradiómetro de balanço foi calibrado, obtendo-se uma recta de calibração com um coeficiente de determinação de 0.9988.

4.4. Condições meteorológicas durante o período de ensaio

Durante os dois períodos de ensaio, tanto na cultura do tomate como na da alface, foram medidas uma série de variáveis meteorológicas com o equipamento indicado no Quadro 4.1.

Na Figura 4.2 encontra-se representada a evolução da radiação líquida em W m^{-2} ao longo do dia nos diferentes dias considerados para a cultura da alface e do tomate. Para este estudo utilizaram-se apenas os valores positivos da radiação ($R_n > 0$), sendo que o período de horas considerado difere entre as culturas, pois enquanto que, para a cultura do tomate, se considerou os dados obtidos a partir sensivelmente das 7 h, para a cultura da alface considerou-se os valores a partir aproximadamente das 9 h. No entanto, é visível, em ambas as culturas, a evolução decrescente da R_n ao longo do dia, atingindo o seu máximo sensivelmente às 13 h, com um valor de 550-600 W m^{-2} . Os valores mínimos da R_n ocorreram, como é de esperar, na cultura do tomate pois está-se a considerar mais valores ao longo da manhã.

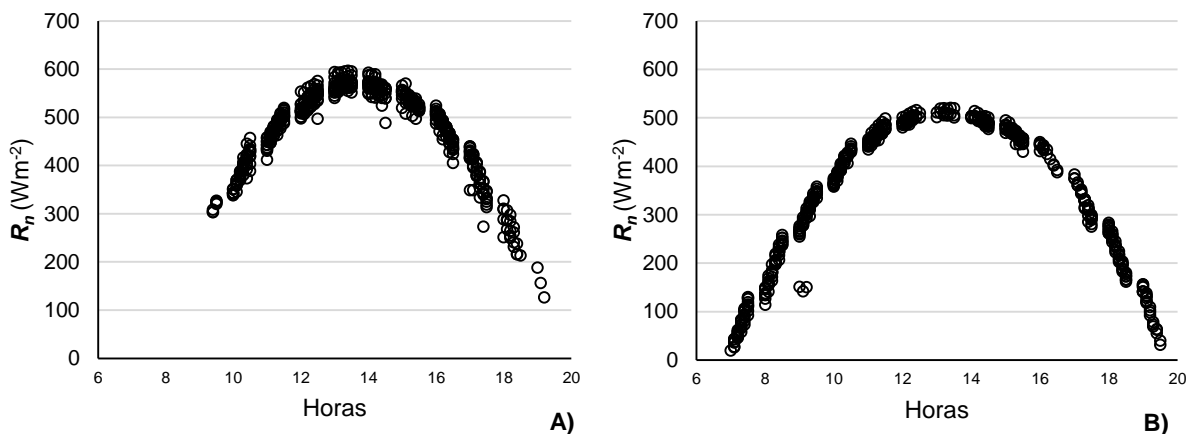


Figura 4.2 - Radiação líquida (R_n) em W m^{-2} registada durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.

Na Figura 4.3 estão ilustrados os valores registados da temperatura do ar, máxima, média e mínima ao longo do período de ensaio para cada uma das culturas. É notável que a temperatura do ar ao longo dos dias foi mais uniforme na cultura do tomate, e que se registaram em geral valores de temperatura mínima menores na cultura do tomate. Isto está relacionado com o facto de a obtenção de dados na cultura da alface começar a ser feita 1 hora mais tarde relativamente à do tomate. Analisando a Figura 4.4, que representa os valores de temperatura do ar ao longo do dia, verifica-se que os valores mínimos de temperatura do tomate se registam sobretudo entre as 6 h e as 10 h.

A evolução ao longo do dia da temperatura do ar e da humidade relativa (HR) (Figura 4.5) difere claramente na forma e também no valor do pico destas variáveis, que ocorre aproximadamente às 14 h, sendo que com a continuação do dia não se verifica grande variação nos valores das duas grandezas. Este fator justifica a ocorrência de histerese quando se relaciona a temperatura, déficit de pressão de vapor e radiação líquida em dias de condições consideradas médias para cada cultura (Figuras 4.8).

Na Figura 4.6 é possível identificar a elevada correlação que se verificou entre a temperatura do ar e a humidade relativa. No caso da cultura do tomate verificaram-se valores relativamente inferiores de HR aos da cultura da alface. Na Figura 4.7 verifica-se uma maior amplitude nos valores de DPV na cultura do tomate.

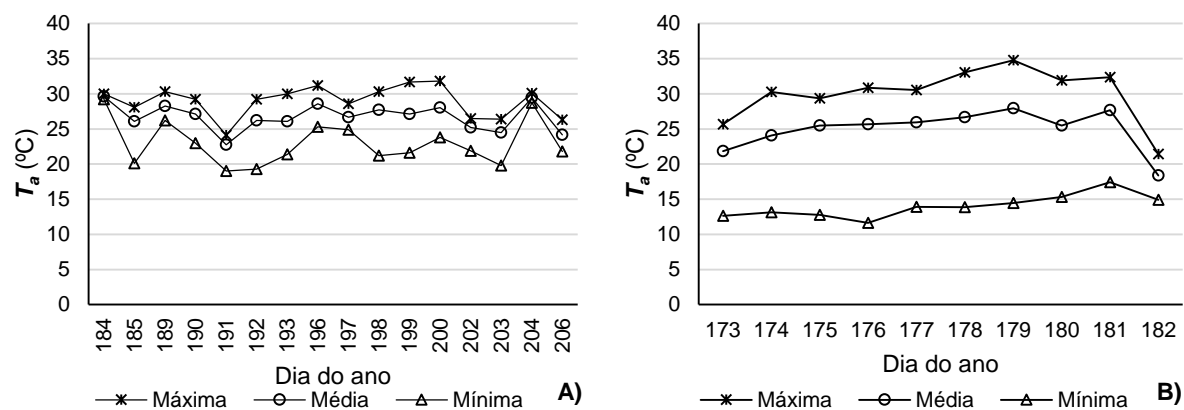


Figura 4.3 - Temperatura máxima, média e mínima do ar (T_a) registrada durante o período de ensaio na cultura: A) alface; B) tomate.

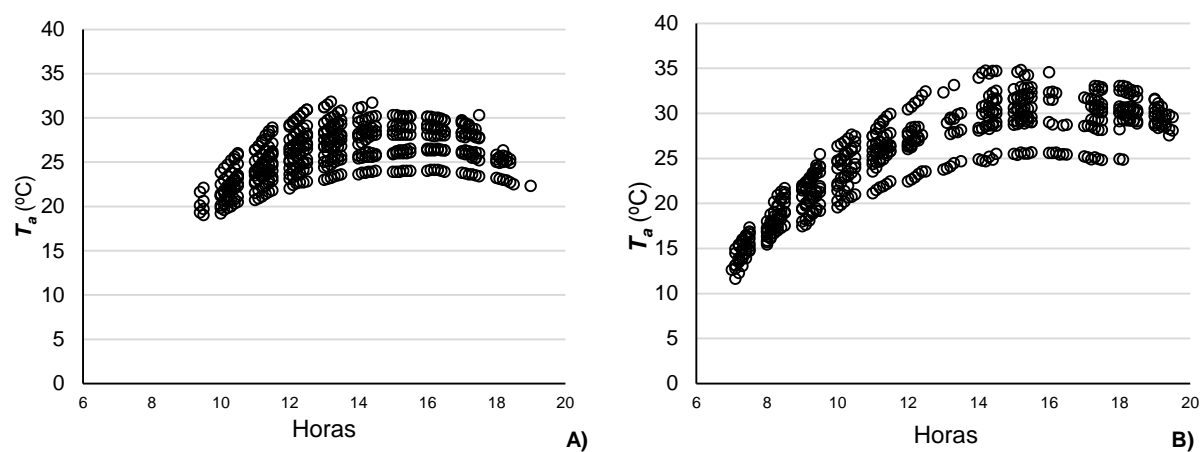


Figura 4.4 - Temperatura do ar (T_a) registrada durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.

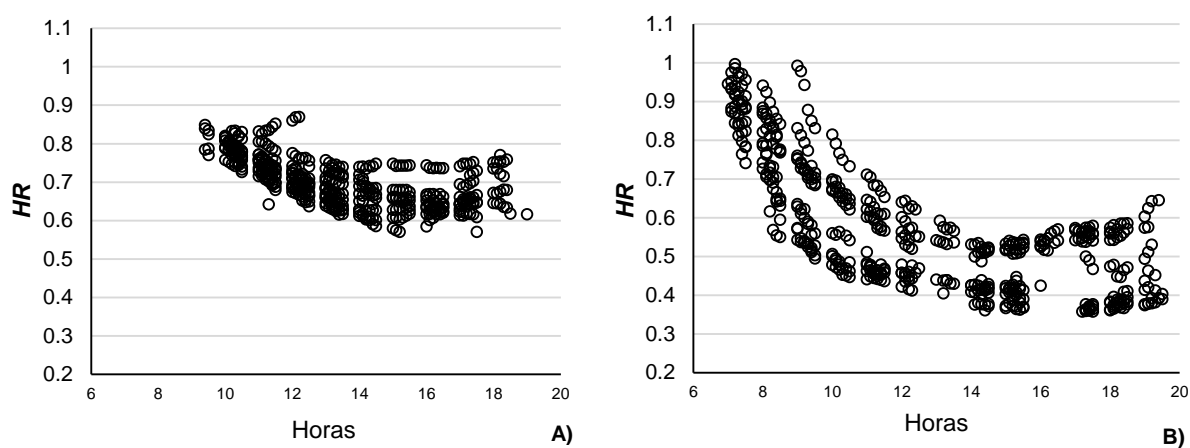


Figura 4.5 - Valores de humidade relativa (HR) registados durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.

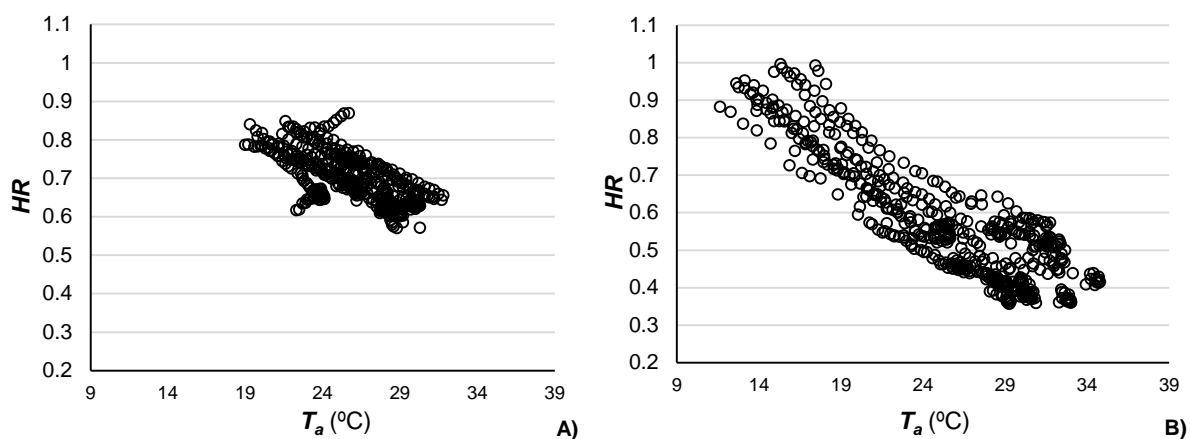


Figura 4.6 - Relação entre a temperatura do ar (T_a) e a humidade relativa (HR) durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.

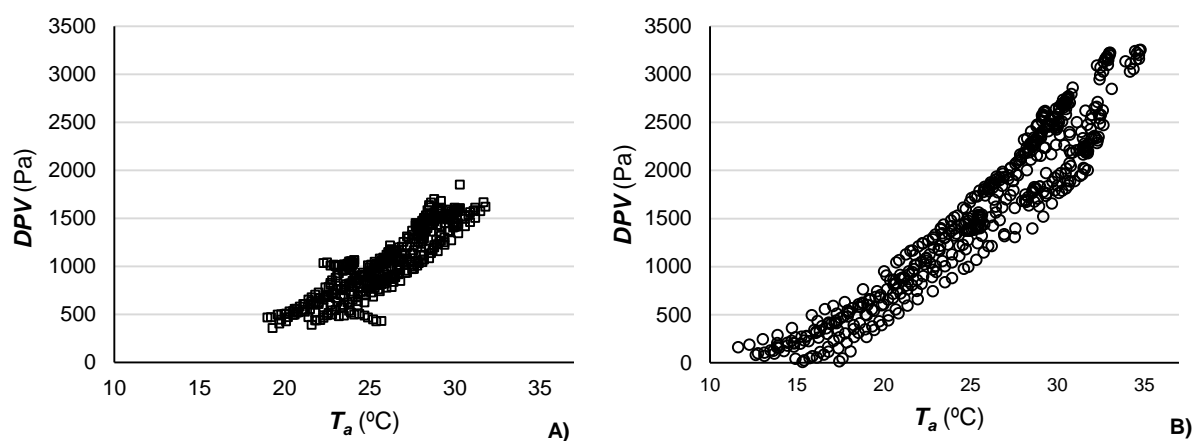


Figura 4.7 - Relação entre a temperatura do ar (T_a) e o défice de pressão de vapor (DPV) durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.

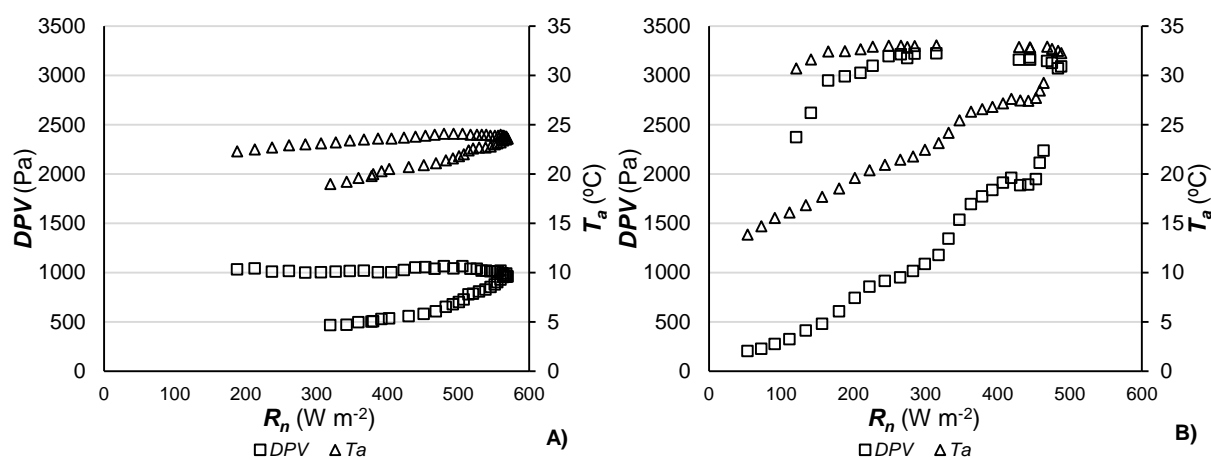


Figura 4.8 - Valores da temperatura do ar (T_a) e do défice de pressão de vapor (DPV) verificados no dia 191 na cultura da alface (A), e no dia 178 na cultura do tomate (B).

Durante a manhã ocorreram valores de velocidade de vento mais baixos bem como ao fim do dia (Figura 4.9). Para a cultura do tomate¹, verificaram-se condições de estabilidade da atmosfera, e ao longo do dia condições de neutralidade associadas a uma velocidade de vento moderada (Figura 4.10).

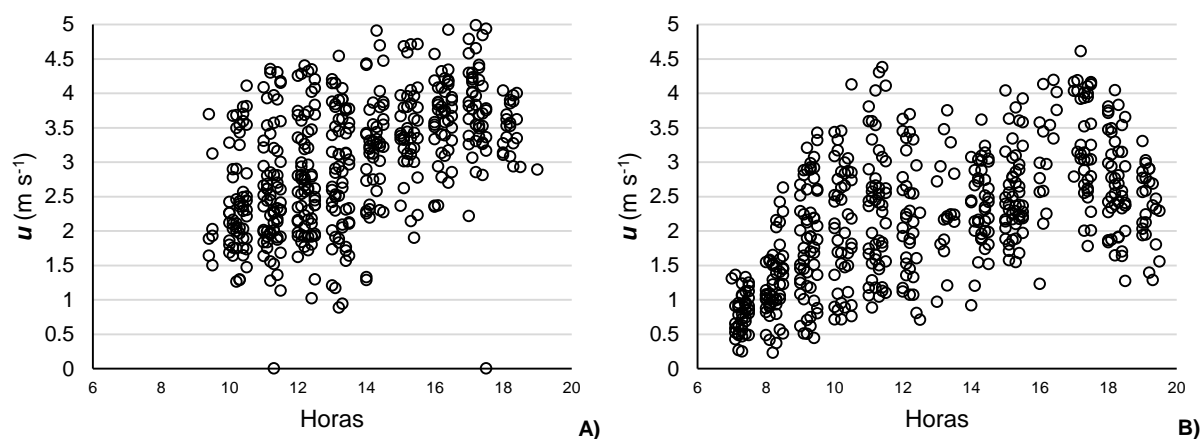


Figura 4.9 - Velocidade do vento (u) a 1.58 m do solo, registada durante o período de ensaio na cultura de: A) alface; B) tomate.

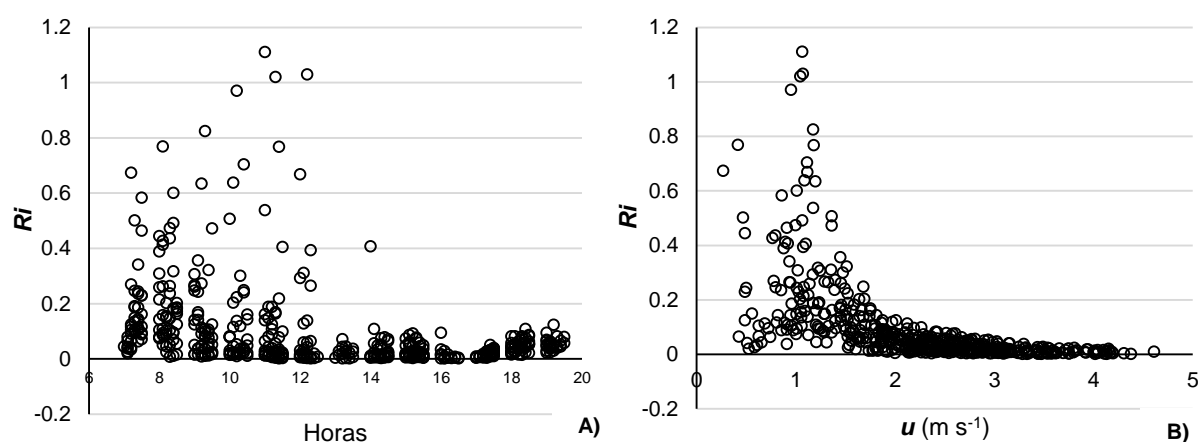


Figura 4.10 – Em A) condições de estabilidade da atmosfera avaliadas pelo número de Richardson (Ri) e em B) a relação entre a velocidade do vento e as condições de estabilidade da atmosfera registadas durante o período de ensaio na cultura do tomate.

¹ As condições de estabilidade da atmosfera foram avaliadas pelo número de Richardson (Ri) (equação [3.36]).

4.5. Tratamento dos dados

4.5.1. Determinação dos parâmetros aerodinâmicos d e z_o

Os parâmetros aerodinâmicos d e z_o foram determinados apenas com valores de velocidade do vento em condições de neutralidade térmica. Para avaliar a estabilidade da atmosfera utilizou-se o número de Richardson (equação [3.36]), e reteve-se os valores correspondentes a $|R_i| < 0.1$.

O valor de d foi obtido a partir da equação [3.39]. Tratou-se de um processo de tentativas compreendidas no intervalo de $[0, h_c]$, utilizando um incremento de $h/50$. Utilizou-se o valor a que correspondeu um coeficiente de determinação maior. O parâmetro z_o foi determinado pela ordenada na origem da recta que foi ajustada aos dados (Alves, 1995).

4.5.2. Cálculo do balanço da radiação da vegetação (R_{nc}) e do fluxo de calor de e para o solo (G)

Consideraram-se apenas os períodos em que $R_n > 0$, uma vez que é durante estes que ocorre evapotranspiração. A parte da radiação líquida que é interceptada pelo coberto vegetal (R_{nc}), em cobertos heterogêneos, é a que tem mais influência na evapotranspiração. Conjugando as equações [3.4] e [3.7] tem-se que:

$$R_{nc} = R_n \left[1 - e^{\left(\frac{-k_e \Omega(\varphi) LAI}{\sqrt{2} \cos(\varphi)} \right)} \right] \quad [4.1]$$

Para a determinação do coeficiente de extinção da radiação recorreu-se à equação proposta por Campbell e Norman (1998) (equação [3.6]). Admitindo que a distribuição das folhas se aproxima mais da vertical na cultura do tomate considerou-se um $x = 0.5$ enquanto que no caso da cultura da alface, podendo considerar-se uma distribuição esférica das folhas, se optou por um $x = 1$.

Ainda para o cálculo do k_e foi necessário determinar o ângulo zenital (φ). O φ é uma das medidas usadas para determinar a posição do sol no céu, e enquanto que a altura é o ângulo de elevação acima do horizonte, o ângulo zenital é medido a partir da vertical. O seu cálculo depende da determinação de vários cálculos intermédios como a declinação solar, a correção da longitude, e a equação do tempo (Campbell e Norman, 1998).

Na determinação do fluxo de calor sensível para o solo, G , tendo em conta que este não foi medido no terreno, optou-se para a cultura da alface em considerar, tal como Bruin (1982) sugere, que este correspondesse a uma parte fixa da radiação líquida. O facto de se tratar de um coberto contínuo e homogêneo em que a maior parte da superfície não está exposta à radiação permite pressupor que a variação do G ao longo do dia não é significativamente diferente. Assim sendo, considerou-se que G seria equivalente a 15% da R_n (equação [3.11]).

Num coberto descontínuo, como se verifica na cultura do tomate, é de esperar maior variabilidade dado que parte da superfície está exposta à radiação. Paço (2003), num estudo realizado num coberto

descontínuo de um pomar de pessegueiro, mediu o G ao longo dos dias de ensaio de forma a avaliar a importância relativa desta componente no balanço energético, encontrando relações que pudessem ser posteriormente utilizadas em casos em que não se medisse o G . Verificou a ocorrência de um desfasamento temporal de cerca de uma hora entre o máximo diário de G e o máximo de R_n e, relacionando ambas as variáveis, obteve uma correlação positiva, em que G de um instante t se relaciona com R_n do instante $t + 1$. Assim, aplicou-se a mesma relação na determinação do G na cultura do tomate, por se tratar de um coberto descontínuo:

$$G_t = 0.0005 R_{n_{t+1}}^2 + 0.0874 R_{n_{t+1}} - 52.59 \quad [4.2]$$

4.5.3. Cálculo da resistência aerodinâmica (r_a)

Para o cálculo da resistência aerodinâmica ao fluxo de calor sensível utilizou-se a seguinte equação, já referida:

$$r_a = \frac{\ln[(z - d) / (h_c - d)] \ln[(z - d) / z_o]}{k^2 u(z)} \quad [3.45bis]$$

4.5.4. Determinação do fluxo de calor latente (LE) pelo método aerodinâmico na cultura do tomate

O LE foi determinado como termo residual da equação de balanço energético (equação [3.18]), conhecendo os valores medidos de R_n e obtendo os valores de G a partir da equação [4.2]. O H foi determinado pelo método proposto por Itier (1981), designado neste trabalho de H_{It} (organograma do modelo no Anexo I). Este método foi aplicado apenas para a cultura do tomate, para a qual tínhamos valores da velocidade do vento e da temperatura em dois níveis diferentes (Quadro 4.1).

4.5.5. Determinação do fluxo de calor latente (LE) pelo método da razão de Bowen na cultura da alface

Na cultura da alface optou-se por determinar o LE utilizando o método da razão de Bowen, calculado a partir da seguinte equação já enunciada:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad [3.21bis]$$

onde ΔT foi determinado pela diferença de temperatura do termómetro seco de 2 psicrómetros à altura de 0,85 e 1,46 m, e Δe obtido a partir da seguinte expressão:

$$\Delta e = \Delta [e(T_w)] - \gamma (\Delta T - \Delta T_w) \quad [3.22bis]$$

Em sequência do cálculo da razão de Bowen, determinou-se a densidade de fluxo de calor latente e de fluxo de calor sensível.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad ; \quad H = \beta LE \quad [3.20bis]$$

4.5.6. Determinação da temperatura do bolbo molhado da superfície (T_{wo})

Aplicando a equação derivada da curva de pressão de vapor e descrita por Monteith e Unsworth (1990) e citado por Alves e Pereira (2000) temos a seguinte equação:

$$e = e_s(T) - (\Delta + \gamma)(T - T_w) \quad [4.3]$$

onde e é a pressão de vapor atual (Pa), $e_s(T)$ a pressão de vapor saturada (Pa) à temperatura T (°C), T e T_w são respetivamente a temperatura de bolbo seco e de bolbo húmido (°C) à altura de referência.

Aplicando a mesma equação para determinar a pressão de vapor ao nível da superfície (e_o) fica:

$$e_o = e_s(T_o) - (\Delta + \gamma)(T_o - T_{wo}) \quad [4.4]$$

onde T_{wo} , e T_o são, respetivamente, a temperatura de bolbo molhado e de bolbo seco ao nível da superfície.

Conhecendo o fluxo de calor latente (LE) determinado a partir da razão de Bowen na cultura da alface e pelo método aerodinâmico proposto por Itier (1981) para a cultura do tomate, ambos já descritos, e sabendo ainda a expressão (equação [3.15]) para o cálculo do fluxo de calor latente, é possível retirar desta o valor do e_o , de forma a ficar como incógnita na equação [4.4] apenas a temperatura de bolbo molhado ao nível da superfície (T_{wo}).

$$LE = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \frac{(e_o - e_a)}{r_a} \quad [4.5]$$

Por forma a determinar a temperatura mínima que ocorre na superfície (T_s), e que se verifica em condições de pleno conforto hídrico cuja resistência do coberto é aproximadamente zero, utilizou-se a seguinte fórmula (Alves e Pereira, 2000):

$$T_s = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{r_a}{\rho_a c_p} (R_n - G) + T_w \quad [4.6]$$

4.5.7. Determinação do fluxo de calor sensível (H) utilizando a temperatura radiativa (T_r)

Com o objetivo de procurar uma relação entre a T_r e a T_o , pois como já foi dito anteriormente a simples substituição na equação de fluxo de calor sensível não tem mostrado grandes resultados em cobertos descontinuos, determinou-se esta última como um termo residual da equação de fluxo de calor sensível calculado a partir do método de Itier (1981) na cultura do tomate e do método da razão de Bowen na cultura da alface, ficando da seguinte forma:

$$T_o = \frac{H * r_a}{\rho_a c_p} + T_a \quad [4.7]$$

O modelo utilizado neste estudo baseou-se numa abordagem desenvolvida por Troufleur *et al.* (1997), que consiste em procurar uma relação linear entre diferenças relativas da temperatura, então usaram-se as seguintes equações já enunciadas:

$$T_r - T_o = f(T_r - T_a) = \alpha_1 (T_r - T_a) + \alpha_2 \quad [3.58bis]$$

$$H = \rho_a c_p \frac{(1 - \alpha_1)(T_r - T_a) - \alpha_2}{r_a} \quad [3.59bis]$$

Utilizaram-se as temperaturas radiativas obtidas no campo para cada 10 min e a temperatura aerodinâmica T_o obteve-se indirectamente a partir da equação do fluxo de calor sensível.

4.5.8. Determinação de outros parâmetros climáticos

Os parâmetros climáticos usados na determinação de diferentes grandezas foram calculados segundo as seguintes fórmulas (Allen *et al.*, 1994):

- Tensão de vapor saturante e_s (Pa) à temperatura T (°C):

$$e_s(T) = 610.8 e^{\frac{17.27 T}{T + 237.3}} \quad [4.8]$$

- Declive da recta de tensão de vapor saturante Δ (Pa °C⁻¹) na T (°C):

$$\Delta = \frac{4098 e_s(T)}{(T + 237.3)^2} \quad [4.9]$$

- Calor latente de vaporização L (MJ kg⁻¹):

$$L = 2.501 - 2.361 \times 10^{-3} T \quad [4.10]$$

- Constante psicrométrica γ (Pa °C⁻¹):

$$\gamma = \frac{165.12}{L} \quad [4.11]$$

- Densidade (ρ_a) e calor específico (c_p) do ar à temperatura T (K):

$$\rho_a c_p = \frac{2147 \gamma L}{T} \quad [4.12]$$

4.6. Análises Estatísticas

As análises estatísticas foram executadas combinando o programa Excel (Office 2016) e *R* (versão 3.2.2). De forma a avaliar a relação entre variáveis efectuaram-se regressões lineares simples ou múltiplas. Para averiguar a qualidade do ajustamento tiveram-se em conta os valores do coeficiente de correlação (r) e do coeficiente de determinação (R^2) e procedeu-se em alguns casos a uma análise estatística do tipo descritivo (média, desvio padrão, variância, máximo e mínimo).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Balanço da radiação líquida do coberto (R_n) e balanço da radiação líquida da vegetação (R_{nc})

Na Figura 5.1 está representada a evolução diurna da radiação líquida (R_n) e da radiação líquida do coberto (R_{nc}) determinada pela equação [4.1]. Considerou-se o período diurno, em que $R_n > 0$, visto ser durante este que os estomas estão activos e possibilitam a perda de água.

Como é visível, os picos máximos de radiação ocorrem quase em simultâneo com o meio dia solar, quando o φ é mínimo. De igual forma é de notar que o rácio R_{nc} / R_n é mínimo também quando ocorre o meio dia solar.

Embora a partição da radiação e a determinação da componente intercetada pelo coberto R_{nc} , em cobertos heterogêneos, permita uma aproximação maior da radiação que chega à planta e que terá maior influência na perda de água², não se efetuou a separação da radiação nas suas componentes tendo em conta que para o cálculo da resistência aerodinâmica já se consideraram parâmetros relevantes para o efeito.

Os resultados mostram que durante a manhã, até às 10 horas, e ao fim do dia, a partir das 17 horas, a componente que mais peso tem na radiação líquida da superfície é a componente da vegetação, sendo que a R_{ns} apresenta maior relevância no período compreendido entre estas horas, tanto na cultura da alface como na do tomate.

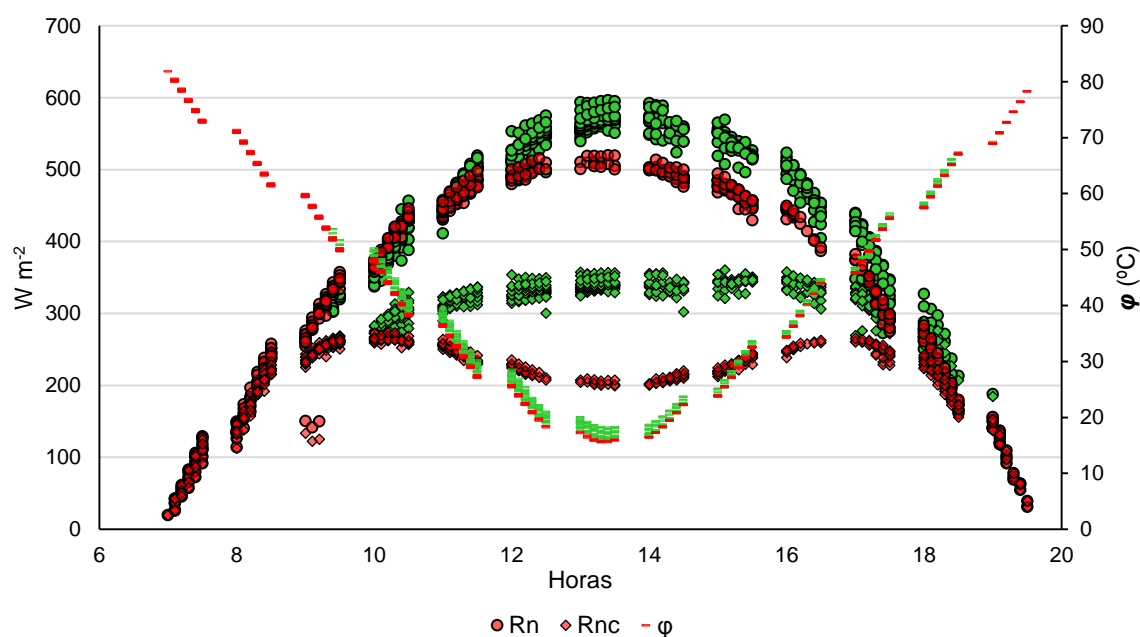


Figura 5.1 - Evolução diurna do balanço da radiação líquida (R_n) medido, do balanço da radiação líquida da vegetação (R_{nc}) e do ângulo zenital do sol (φ) (os resultados da alface são apresentados a verde e os do tomate a vermelho).

² A partição da radiação tem particular interesse em culturas de coberto parcial, como é o caso do tomate, pois tem sido demonstrado que a radiação que chega à vegetação (R_{nc}) tem maior importância na determinação da evapotranspiração.

Densidade de fluxo de calor de e para o solo (G)

A partir dos valores medidos da radiação líquida foi considerado que 15% desta representava o G ocorrido durante o período de ensaio na cultura da alface, já para a cultura do tomate recorreu-se ao método proposto por Paço (2003), equação [4.2]. Os resultados para ambas as culturas estão representados na Figura 5.2.

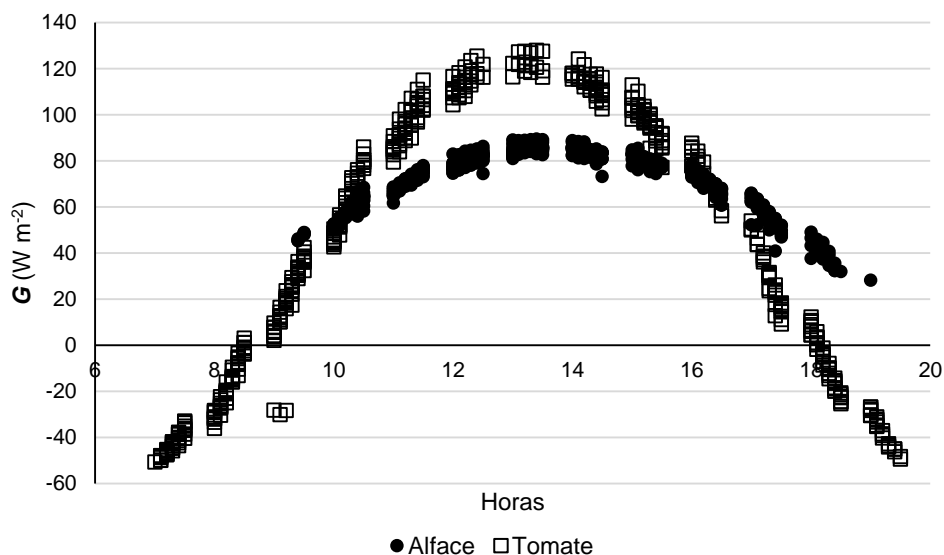


Figura 5.2 – Evolução diurna da densidade de calor de e para o solo (W m^{-2}) determinada ao longo do período de ensaio para ambas as culturas.

A evolução diária da densidade de fluxo de calor sensível apresenta valores negativos na cultura do tomate, sobretudo no período da manhã até às 8h, e ao fim do dia a partir das 18h. Já na cultura da alface estes valores não se verificam no período da manhã pois o período do ensaio ocorre depois das 8h, o que é coincidente com os valores positivos na cultura do tomate. O pico da G na cultura do tomate é bastante mais evidente, tendo um máximo de 128 W m^{-2} face ao máximo de 89 W m^{-2} na cultura da alface. Tendo em conta que se trata de uma cultura de coberto parcial, em que o solo se encontra naturalmente mais exposto, é de esperar que esta componente tenha um peso maior no balanço total da radiação.

Densidade de fluxo de calor sensível (H)

Para a cultura da alface recorreu-se ao método da razão de Bowen para a determinação do H (H_{RB}), enquanto que para a cultura do tomate optou-se pelo método aerodinâmico proposto por Itier (1981) (H_{It}) (Anexo I). Os resultados estão presentes na Figura 5.3.

Enquanto que na cultura da alface a densidade de fluxo de calor sensível tem um padrão mais ordenado, apresentando um máximo coincidente com o meio dia solar, a cultura do tomate apresenta uma maior amplitude de valores, com dois picos que se verificam entre as 9-12h e 17-19h. Tendo em

conta que o coberto do tomate é um coberto parcial, por se encontrar em linhas, o padrão caótico da densidade de fluxo de calor sensível pode estar relacionado com um maior aquecimento do solo.

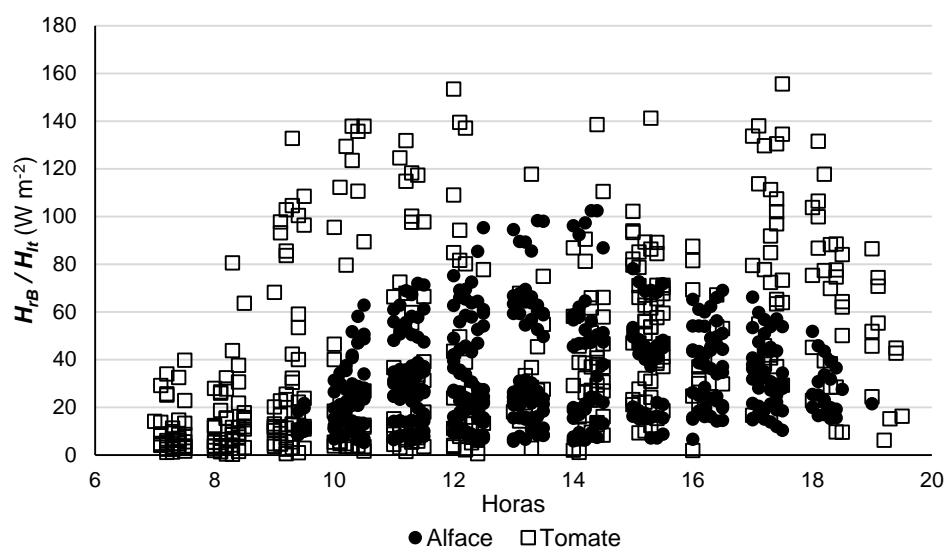


Figura 5.3 - Evolução diurna da densidade de fluxo de calor sensível (W m^{-2}) determinada ao longo do período de ensaio para a alface (H_{sB}) e para o tomate (H_{t}).

Em consequência, espera-se que a LE tenha um maior peso no balanço total da radiação na cultura da alface do que na do tomate face aos valores medidos de R_n (Figura 5.1) e aos valores determinados do G e do H (Figuras 5.2 e 5.3).

Densidade de fluxo de calor latente (LE)

A densidade de fluxo de calor latente foi determinada como termo residual do balanço de energia para ambas as culturas. Os resultados encontram-se representados na Figura 5.4.

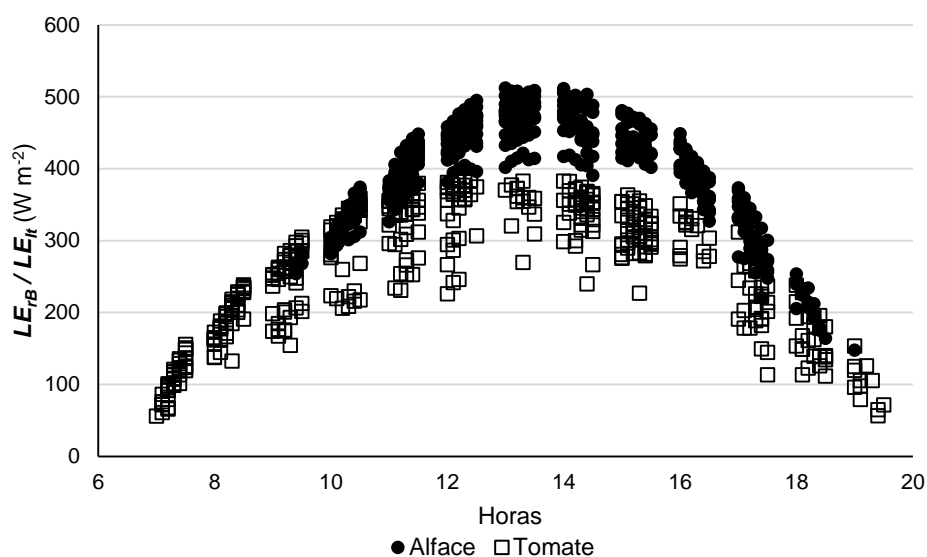
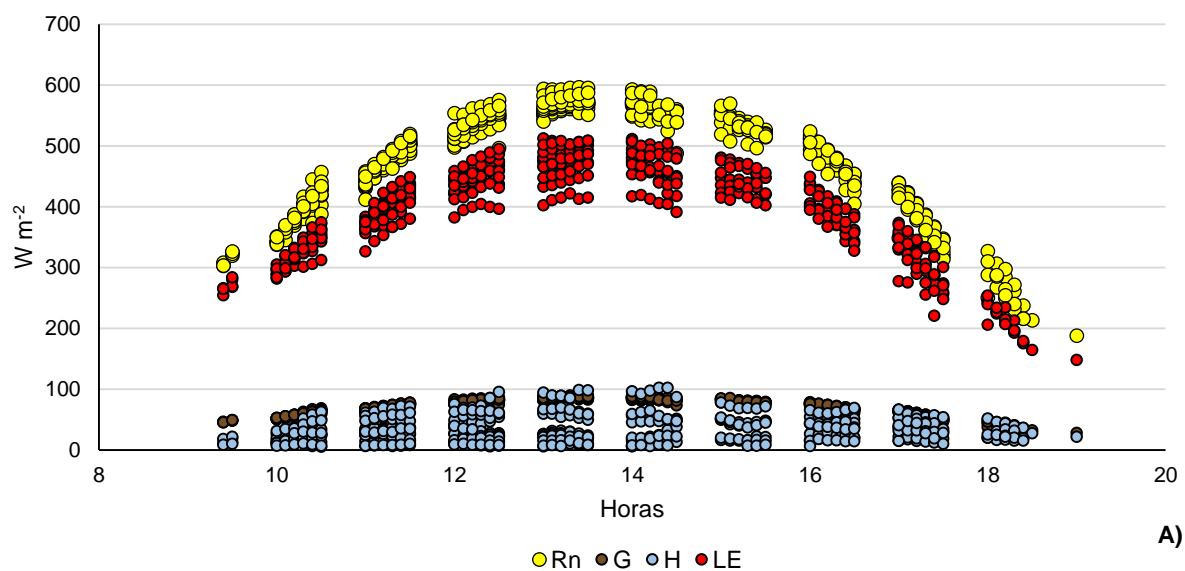


Figura 5.4 - Evolução diurna da densidade de fluxo de calor latente (W m^{-2}) determinada ao longo do período de ensaio para a alface (LE_{rB}) e para o tomate (LE_{It}).

Efetivamente, a componente da densidade de fluxo de calor latente evapotranspiração revelou ser superior na cultura da alface, tal como era expectável, dados os valores de radiação líquida medidos e os valores determinados de densidade de fluxo de calor de e para o solo e de densidade de fluxo de calor sensível.

Na Figura 5.5, vemos as diferentes componentes determinadas do balanço total de energia.



A)

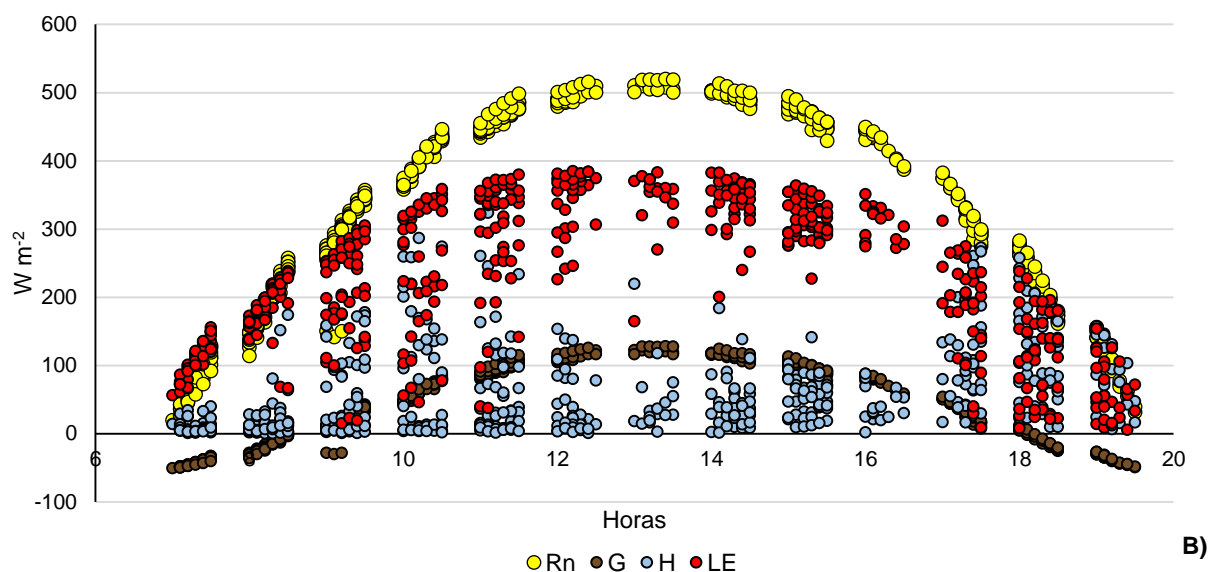
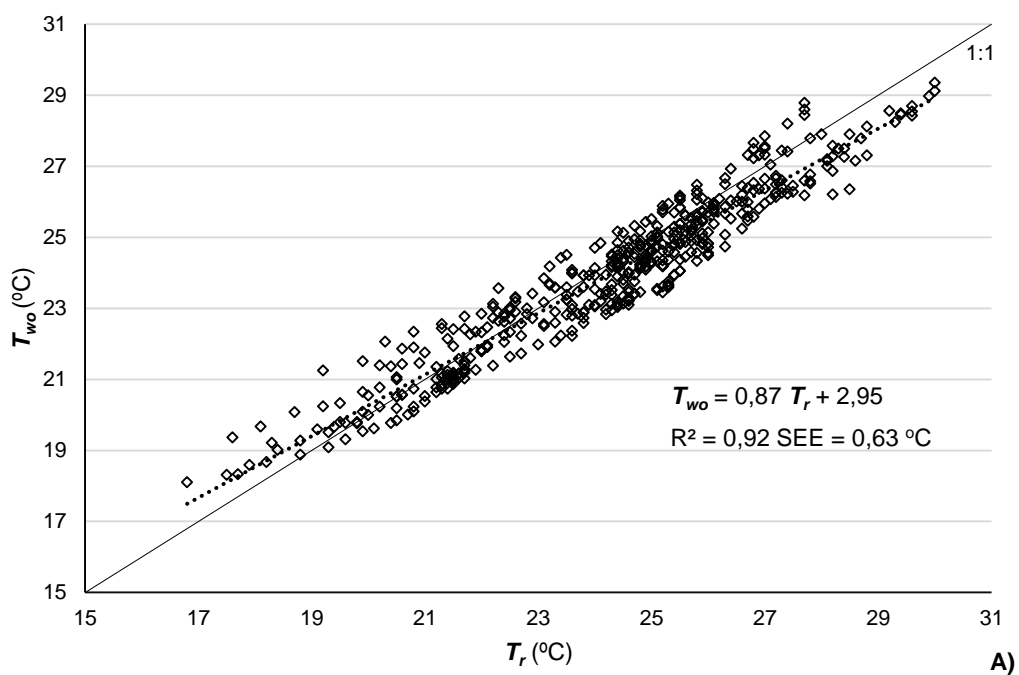


Figura 5.5 – Evolução diurna do balanço da radiação medida (R_n), da densidade de fluxo de e para o solo (G), da densidade de fluxo de calor sensível (H), e da densidade de fluxo de calor latente (LE): A) cultura da alface e B) cultura do tomate.

Temperatura radiativa (T_r) e temperatura de bolbo molhado da superfície (T_{wo})

Para averiguarmos a relação da temperatura radiativa (T_r) medida com o termómetro de infravermelhos, com a temperatura de bolbo molhado da superfície (T_{wo}), calculada como já descrito anteriormente a partir das equações [4.4] e [4.5], para ambas as culturas, construímos a Figura 5.6.



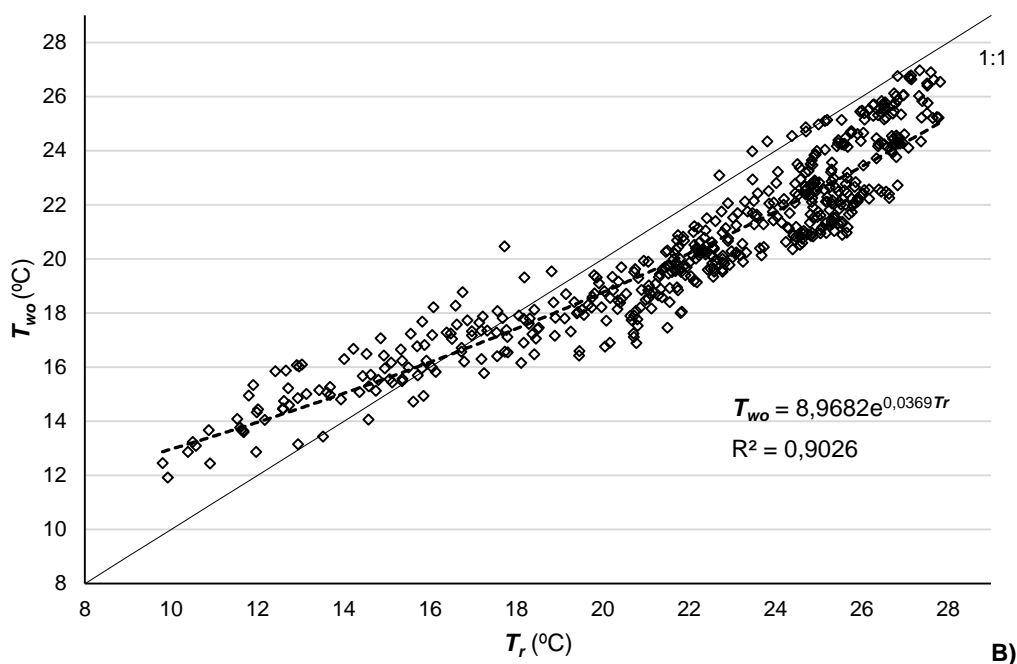


Figura 5.6 - Relação entre a temperatura medida com o termômetro de infravermelhos (T_r) e a temperatura de bolbo molhado determinada à superfície da cultura (T_{wo}): A) na cultura da alface; B) na cultura do tomate. Os parâmetros da regressão são os seguintes: R^2 , coeficiente de determinação e SEE , a estimativa do erro padrão da regressão.

Os resultados obtidos na cultura da alface (Figura 5.6 – A) mostram que existe uma relação linear entre as temperaturas que se aproxima da razão 1:1, com um coeficiente de determinação superior a 0,9. Já para a cultura do tomate existe um maior afastamento, sendo que maioritariamente a T_r sobrestima a T_{wo} . Com uma estimativa do erro padrão de cerca de 1,18°C, aproximadamente o dobro do encontrado na relação entre T_r e T_{wo} na cultura da alface.

Alves e Pereira (2000) mostraram que a T_r pode ser representativa da T_{wo} , em condições de não *stress* hídrico (*non-water-stressed*), considerando-se por isso a resistência do coberto r_c igual a zero, com uma estimativa de erro padrão de 0,77 °C. Os baixos valores da razão de Bowen (Figura 5.7) mostram que na cultura da alface a energia disponível foi praticamente na sua totalidade usada na evapotranspiração ($\beta < 0,4$). Já na cultura do tomate estes valores foram mais variáveis.

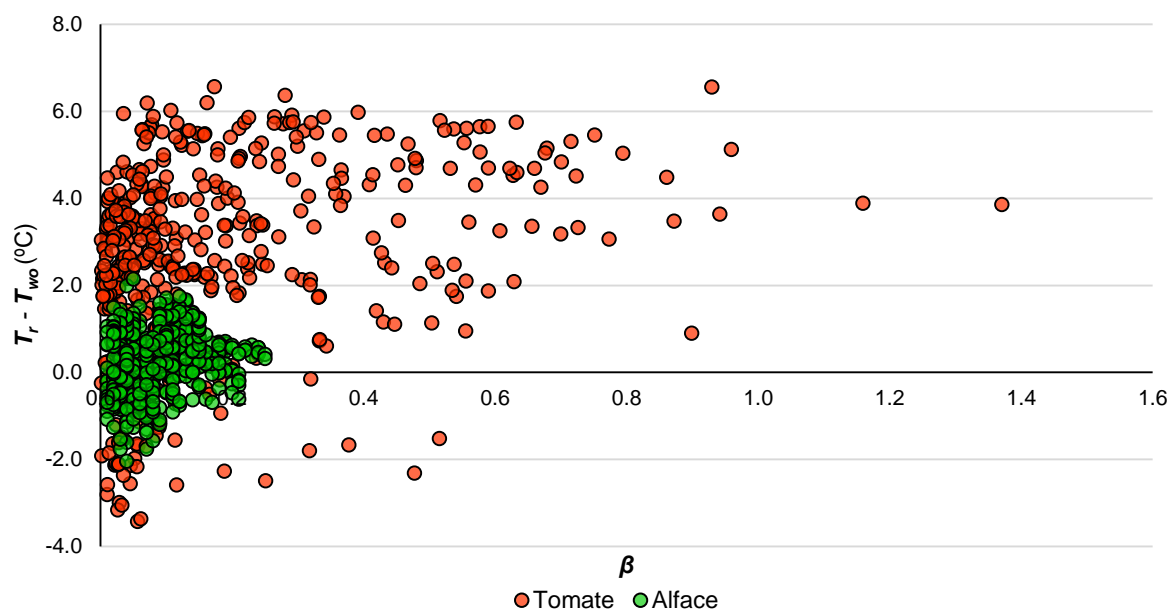


Figura 5.7 - Relação entre os valores da razão de Bowen (β) determinados nas culturas da alface e do tomate e a diferença da T_r e T_{w0} .

Nas Figuras 5.8 e 5.9, apresentam-se os valores da resistência do coberto (r_c) em ambas as culturas, e dos valores de déficit de pressão de vapor (DPV) verificados durante o período de ensaio.

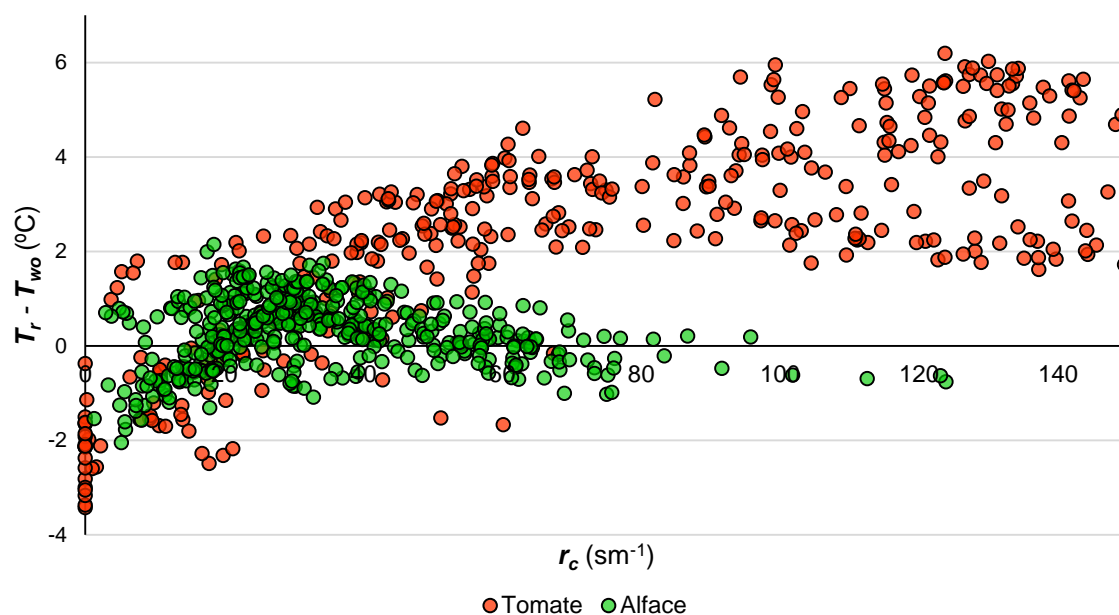


Figura 5.8 – Relação entre os valores determinados da r_c da alface e do tomate e a diferença da T_r e T_{w0} .

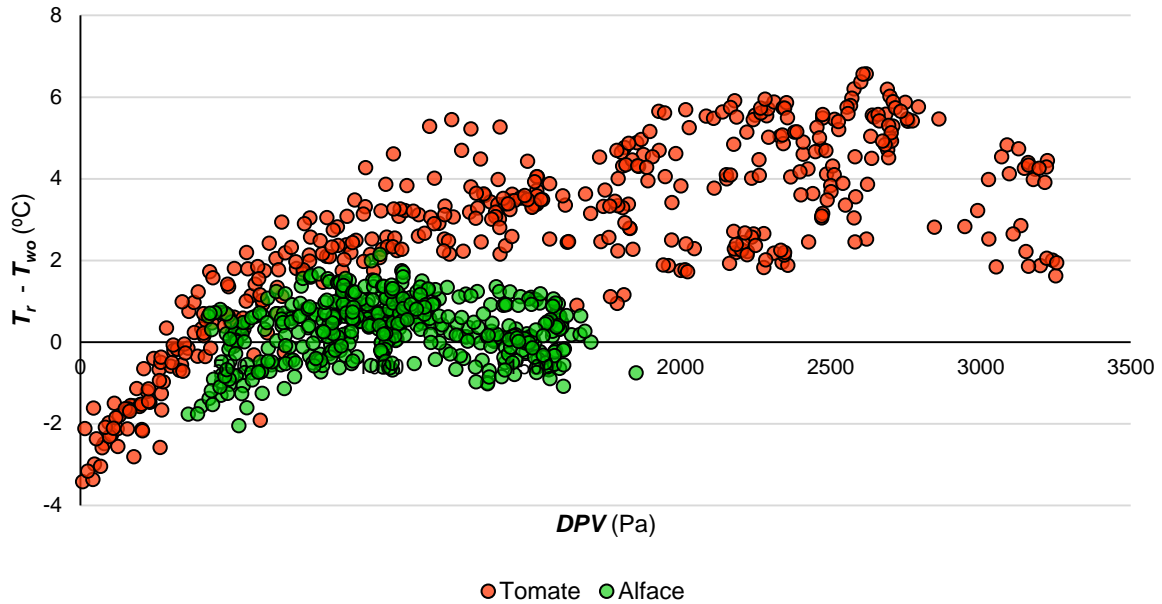


Figura 5.9 - Relação entre os valores verificados do DPV durante o período de ensaio na alface e do tomate e a diferença da T_r e T_{wo} .

Os valores registados da r_c na cultura da alface parecem não influenciar o ligeiro afastamento verificado entre as temperaturas, no entanto na cultura do tomate verifica-se que a ocorrência do maior afastamento das temperaturas, de 4 a 6 °C, coincide com valores mais elevados da r_c . Dado que esta foi calculada a partir da seguinte equação (vidé equação [3.51]):

$$r_c = r_a \left(\frac{\Delta}{Y} \beta - 1 \right) + (1 + \beta) \frac{\rho_a c_p DPV}{Y (R_n - G)} \quad [3.51bis]$$

este maior afastamento poderá estar relacionado com outros parâmetros utilizados no cálculo da mesma. A razão de Bowen já foi referida, e sublinhado o facto de que apresenta valores bastante variáveis na cultura do tomate. Observando os valores do DPV que se verificaram durante o período de ensaio é possível identificar valores mais altos na cultura do tomate e que a maior diferença entre as temperaturas verifica-se para $DPV > 1000$ Pa.

Dada a aproximação entre T_r e T_{wo} , procurou-se substituir a T_{wo} no cálculo do LE pela relação desta com a T_r e comparar os valores com o LE determinado pelo método da razão de Bowen, utilizado na cultura da alface e pelo método proposto por Itier (1981) na cultura do tomate. Conhecendo a relação entre T_{wo} e T_r (Figura 5.6), determinou-se por substituição a pressão de vapor ao nível da superfície (e_o) (equação [4.4]) e calculou-se de seguida a densidade de fluxo de calor latente (equação [4.5]), designada de LE_{e_o} . Na Figura 5.10 encontram-se os resultados para ambas as culturas.

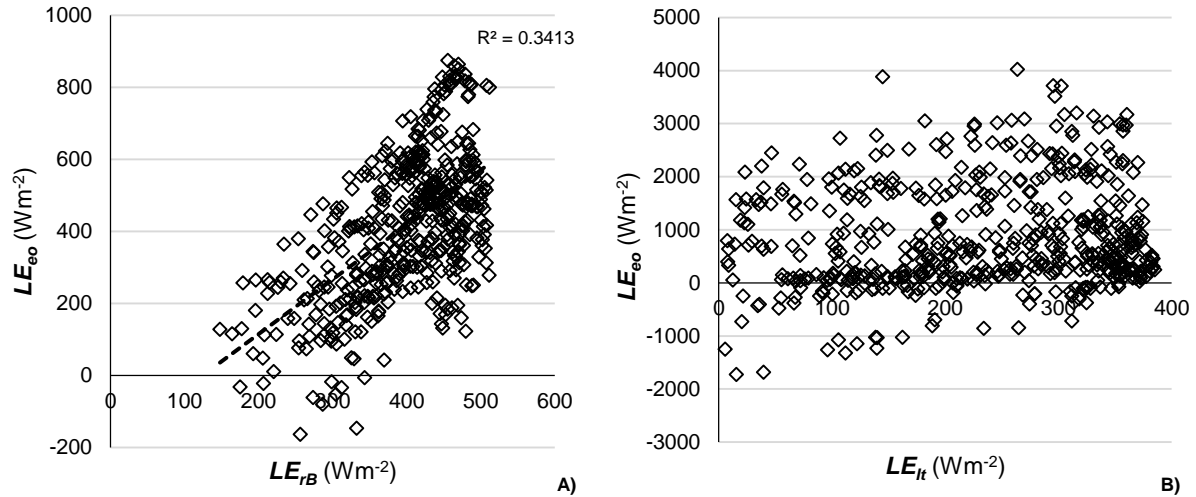


Figura 5.10 - Relação entre LE_{eo} e LE_{rb} na cultura da alface em A) e LE_{eo} e LE_{it} na cultura do tomate em B).

Pela análise dos resultados, concluiu-se que embora a T_r tenha uma relação muito próxima da T_{wo} com a razão de 1:1, o método utilizado para o cálculo do LE com base nesta relação não permitiu obter bons resultados face ao LE determinado pelos métodos base em ambas as culturas. Ainda que na cultura da alface se verifique uma relação linear, existe uma enorme variabilidade nos dados o que se confirma com o baixíssimo coeficiente de determinação de 0,34. Já na cultura do tomate, o método mostrou-se desajustado, tal como se pode observar pelo padrão caótico na Figura 5.10 B) e inútil para a determinação da evapotranspiração, pelo menos partindo da relação entre T_r e T_{wo} .

Temperatura radiativa (T_r) e temperatura aerodinâmica (T_o)

A evolução ao longo do dia da T_o estimada, como termo residual, a partir do H calculado pelo método da razão de Bowen na cultura da alface e do método de Itier (1981) na cultura do tomate designados, respetivamente, neste trabalho de H_{it} e de H_{rb} , bem como a evolução da temperatura radiativa (T_r), estão representadas na Figura 5.11. De forma a compreender o padrão das duas temperaturas, recorreu-se aos dados obtidos num dia médio cujas condições meteorológicas se consideraram representativas dos demais. Apresentam um padrão similar, crescente ao longo do dia, embora a partir aproximadamente das 16 horas comece sensivelmente a decrescer. Para ambas as culturas a T_r e a T_o são estatisticamente diferentes ($p\text{-value} < 0.05$).

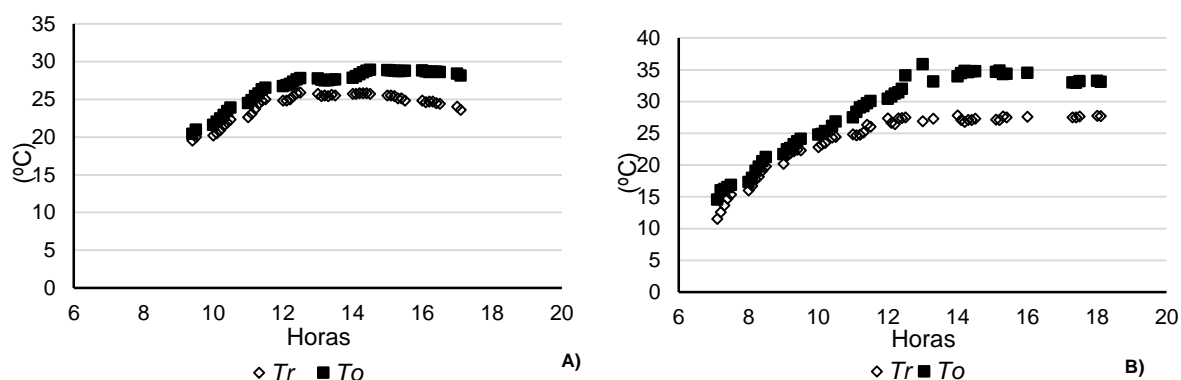


Figura 5.11 - Evolução diurna da temperatura radiativa (T_r) e da temperatura aerodinâmica (T_o) medida e estimada respectivamente: A) na cultura da alface no dia 185; B) na cultura do tomate no dia 179.

Quadro 5.1 – Temperaturas mínima e máxima, média, desvio padrão e variância das temperaturas radiativa e aerodinâmica nas culturas da alface e do tomate.

	Alface (°C)			Tomate (°C)		
	T_o	T_r	$T_o - T_r$	T_o	T_r	$T_o - T_r$
N	467	467	467	520	520	520
Min	19,29	16,80	-0,48	11,78	9,80	-0,59
Max	31,95	30,0	6,26	35,88	27,82	8,97
Média	26,44	24,21	2,23	25,68	22,05	3,64
Variância	7,18	6,39	1,49	31,56	18,59	3,08
Desvio padrão	2,68	2,53	1,22	5,62	4,31	1,76

Apesar da média das temperaturas (Quadro 5.1) ser apenas ligeiramente diferente, a dispersão de valores da T_o é francamente superior à verificada nas medições com o termómetro de infravermelhos no caso do tomate.

Ao longo do período de ensaio, registaram-se na maior parte dos dias valores superiores da T_o , o que mostra que, tal como Kalma *et al.* (1990) afirma, as condições atmosféricas foram maioritariamente estáveis para ambas as culturas. Verificou-se em média uma diferença entre a T_o e a T_r de aproximadamente de 2°C na cultura da alface. De facto, segundo Choudhury *et al.* (1986) e Huband & Monteith (1986), a diferença verificada entre as temperaturas, numa cultura de coberto total, na maioria dos casos não ultrapassa os 2°C. Já na cultura do tomate, essa diferença foi em média de 3,64°C. Apesar de não ser tão acentuada como aquilo que se verifica em alguns dos estudos feitos em culturas de coberto parcial, que pode atingir os 10°C (Kustas, 1990), constataram-se nesta maiores diferenças de temperatura ao longo do período de ensaio, atingindo um máximo de aproximadamente 9°C.

Na Figura 5.12 é visível que a diferença entre as temperaturas ao longo do período de ensaio é elevada e portanto ignorar essa diferença e proceder à substituição da T_o pela T_r vai necessariamente levar a erros na estimativa do fluxo de calor sensível, tal como reportado também por Chehbouni *et al.* (1996), contando que, no presente caso, as diferenças são maioritariamente negativas.

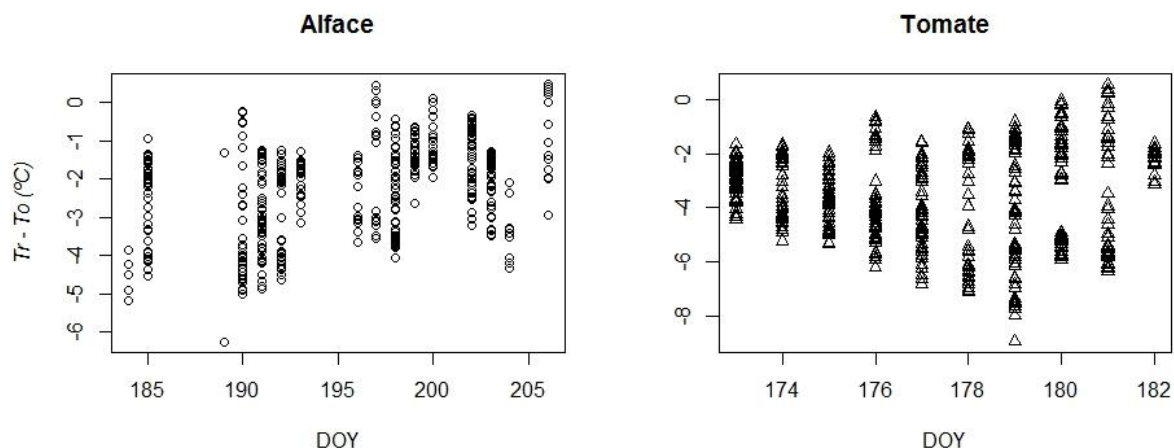


Figura 5.12 - Diferença entre T_o determinada e a T_r medidas, nas culturas da alface e do tomate ao longo do período de ensaio. Em que *DOY* refere-se ao dia do ano.

Assim, procurou-se neste estudo encontrar uma relação entre a T_r e T_o , muito embora se conheça que se tratam de temperaturas com uma base diferente, pois a primeira é uma função da temperatura radiativa, do ângulo de visão do sensor e da morfologia da superfície, e a segunda, para além de ser função da temperatura radiativa da superfície, é-o também das propriedades termodinâmicas do ar que está em contacto com a superfície (Hall *et al.*, 1992).

O que se verifica é que existe uma relação sistemática entre a temperatura radiativa e a aerodinâmica em ambas as culturas, sendo que T_r subestima constantemente a T_o (Figura 5.13).

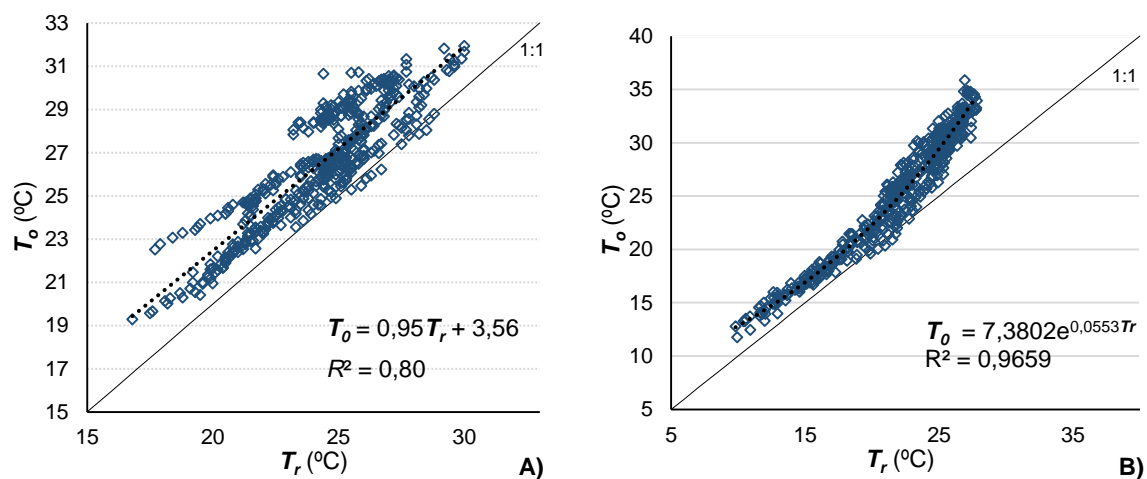


Figura 5.13 – Relação entre a T_o e a T_r : A) na cultura da alface e B) na cultura do tomate. Os parâmetros da regressão são os seguintes: R^2 , coeficiente de determinação.

A simples substituição da T_o pela T_r no cálculo do fluxo de calor sensível não permite pois determinar a evapotranspiração, as duas temperaturas não são iguais, tal como Kustas e Norman (1996) apontam, e é necessário procurar um ajustamento para as aproximar.

Ainda é de referir que na cultura do tomate, e tal como Kustas (1990) refere, o afastamento da T_o da T_r é cada vez maior à medida que esta aumenta e no caso específico verifica-se que T_r parece tender a não ultrapassar um certo limite, observando-se que a partir dos 21°C sensivelmente T_r não acompanha da mesma forma o aumento da T_o (Figura 5.14).

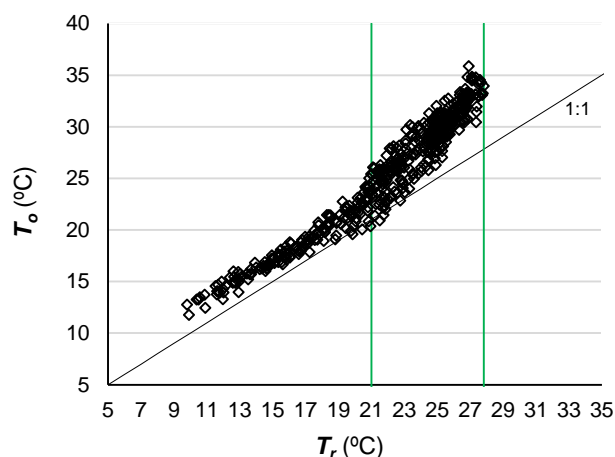
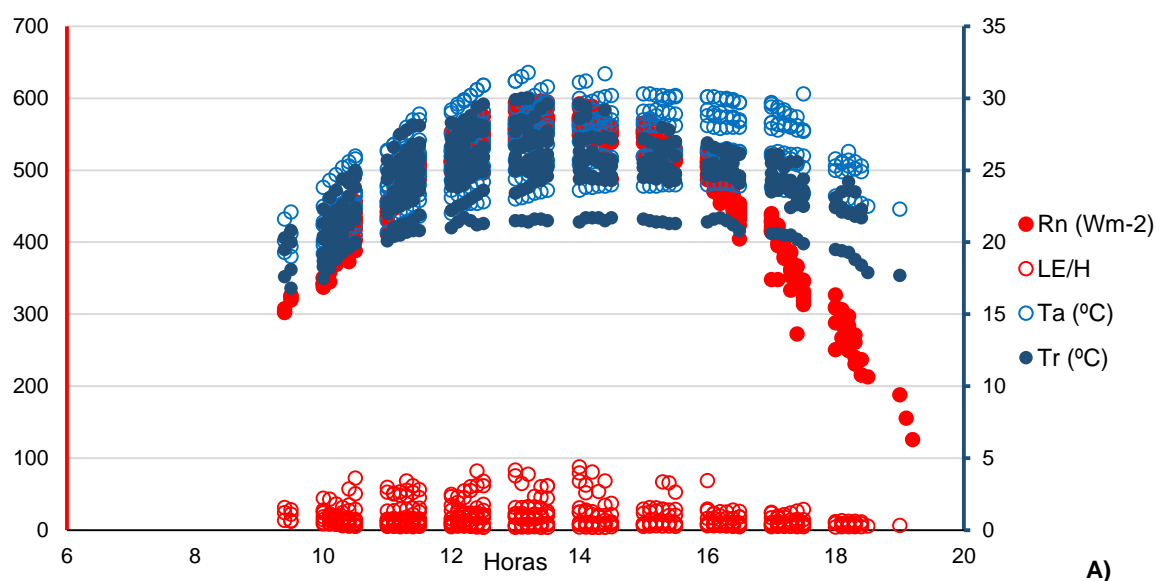


Figura 5.14 - Relação entre a T_o e a T_r na cultura do tomate, com duas zonas definidas.

Este limite que se verifica na T_r pode estar relacionado com a temperatura ótima para a fotossíntese que segundo Almeida (2006), na fase de floração na cultura do tomate, deve rondar os 21°C. É de referir ainda, que as temperaturas ótimas para a ocorrência da maior taxa de assimilação líquida, no caso do tomate, são entre os 25°C e os 30°C. De facto, a cultura encontra-se aproximadamente a 20 dias após o início da floração e, como mostra a Figura 5.14, a partir dos 21°C o declive entre T_r e T_o é maior, o que sugere que a planta vá ajustando mais lentamente a sua temperatura, nunca ultrapassando o máximo de cerca de 28°C, permanecendo dentro do ótimo de temperaturas para a fase em que se encontra.

Para tentar compreender como se comporta a T_r com a partição da densidade de fluxo de calor latente / densidade de fluxo de calor sensível (LE/H) e com outras variáveis climáticas ao longo do dia construímos a Figura 5.15.



A)

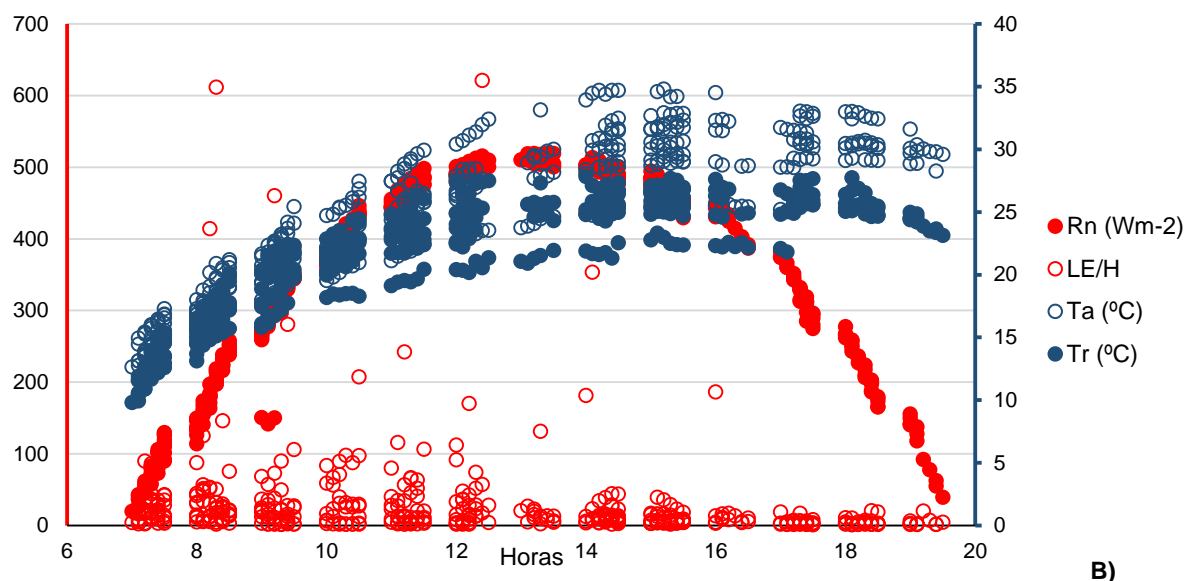


Figura 5.15 – Relação entre o quociente de LE e H , a R_n , a T_a e a T_r e a sua evolução ao longo do dia: A) na cultura da alface e em B) na cultura do tomate. A razão LE/H é determinada a partir do método da razão de Bowen na cultura da alface e do método proposto por Itier (1981) na cultura do tomate.

Na cultura da alface verificam-se valores elevados da razão de LE/H até sensivelmente às 14h, de seguida há uma diminuição da razão que coincide com a diminuição da T_r , no caso bem mais evidente do que na cultura do tomate. O que se verifica nesta última é que a partir das 12h aproximadamente, a partição de LE/H diminui, e ocorre uma estabilidade no valor da T_r . Pela análise dos resultados acima descritos não podemos concluir que exista um ajuste da partição de LE/H na cultura do tomate, de forma a estabilizar a temperatura radiativa. O comportamento da razão é idêntico, apenas no tomate não ocorre diminuição da T_r com o decréscimo da razão LE/H .

Pela observação dos resultados acima expostos, podemos ver que a T_r tem um comportamento semelhante à T_a em ambas as culturas, que decresce a partir das 15h, na cultura da alface e mantém-se sensivelmente constante das 15h às 18h na cultura do tomate.

Por forma a analisar como é que a diferença entre as temperaturas aerodinâmica e radiativa se relaciona com outras variáveis climáticas construímos as seguintes figuras.

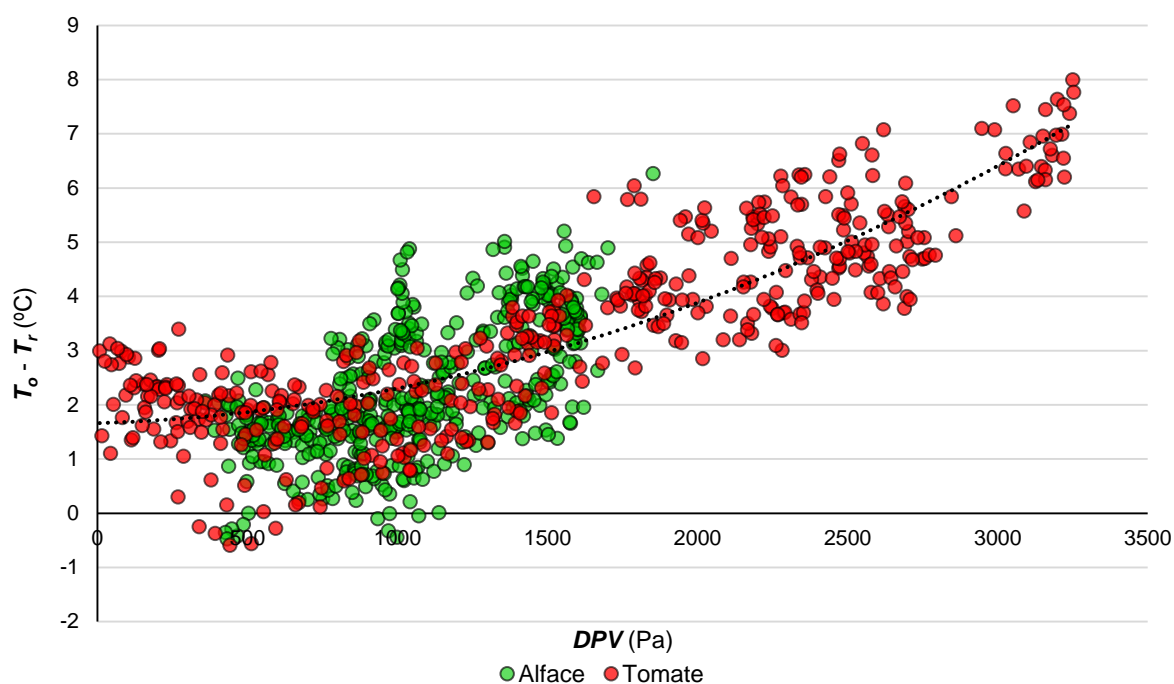


Figura 5.16 - Relação entre os valores verificados do DPV (Pa), durante o período de ensaio da alface e do tomate, e a diferença da T_o e T_r .

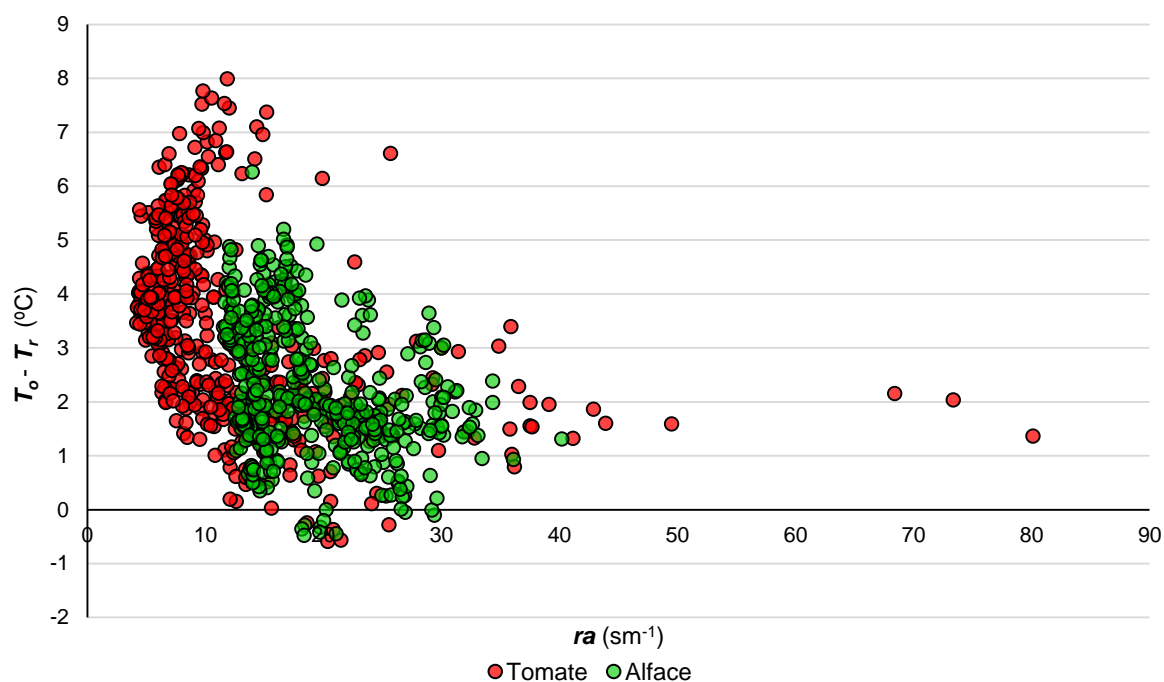


Figura 5.17 - Relação entre os valores da resistência aerodinâmica (ra) (s m⁻¹), durante o período de ensaio da alface e do tomate, e a diferença da T_o e T_r .

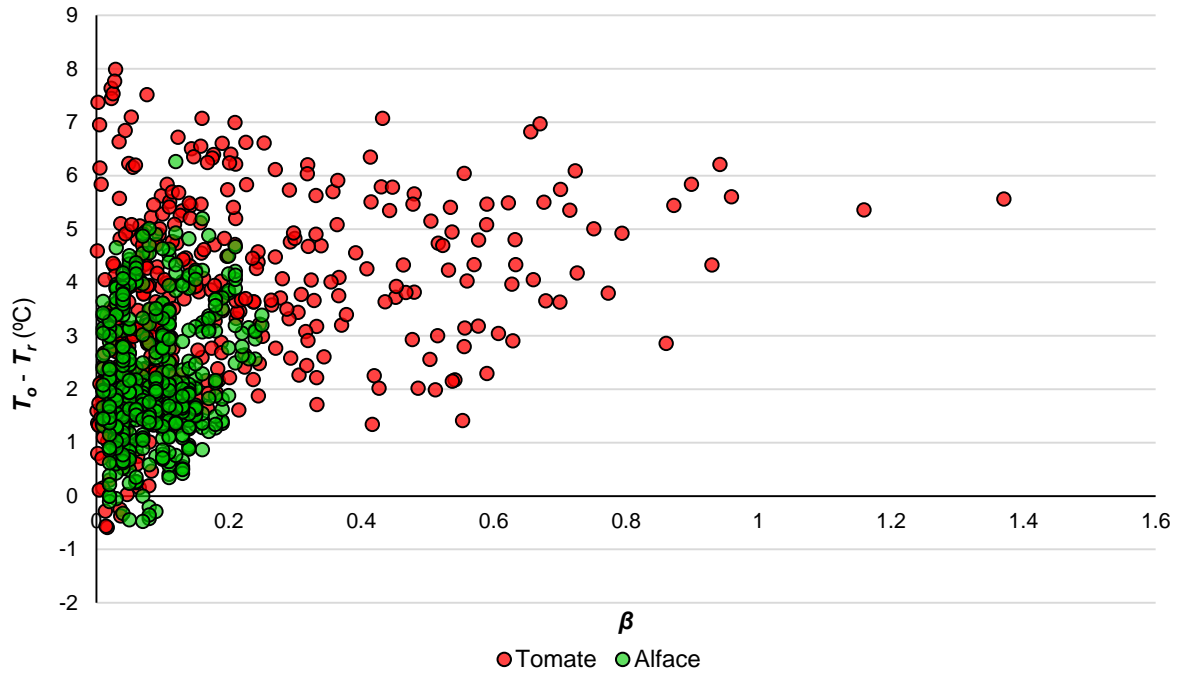


Figura 5.18 - Relação entre os valores da razão de Bowen (β), durante o período de ensaio da alface e do tomate, e a diferença da T_o e T_r .

Na Figura 5.16 apresenta-se a relação entre o déficit de pressão de vapor (em Pa) e a diferença entre as temperaturas aerodinâmica e radiativa, nas duas culturas. Efetivamente, o que se verifica na cultura da alface, em que a diferença de temperaturas não toma valores tão elevados como na cultura do tomate, são valores de DPV substancialmente inferiores aos verificados na cultura do tomate. No caso do tomate, a relação entre a diferença de temperaturas e o DPV é menos concentrada, e pode ser, relativamente, descrita como uma curva.

A relação entre a resistência aerodinâmica (ra) e a diferença de temperaturas (Figura 5.17) permite-nos identificar que as maiores diferenças, acima de 5°C , ocorrem para valores de ra inferiores a 10 s m^{-1} na cultura do tomate. Para a cultura da alface a ra nunca toma valores inferiores a 10 s m^{-1} , o que pode eventualmente justificar a não ocorrência de diferenças de temperatura tão elevadas.

Na Figura 5.18 fica evidente que se registaram valores da razão de Bowen muito superiores na cultura do tomate e também muito mais variáveis. No caso da cultura da alface, conclui-se que a cultura foi conduzida em pleno conforto hídrico, e por isso os valores da β são baixos. Os valores elevados que se verificaram na cultura do tomate coincidiram, analisando de uma forma superficial, com variações repentinas por parte da R_n , o que pode ter sido em resultado da passagem de nuvens. Tal como Jones (1983) refere, as plantas dificilmente se encontram em condições de regime permanente, ou seja, as oscilações ambientais interferem no tempo de resposta das plantas e portanto no seu ajustamento às mesmas.

No sentido de procurar uma forma possível para determinar o LE a partir de valores da temperatura radiativa e tendo em conta que a substituição direta do T_o pelo T_r não permite um bom

ajustamento, procurou-se neste trabalho aplicar o método proposto por Troufleur *et al.* (1997), que mostrou melhores resultados do que outros métodos na determinação da evapotranspiração.

Na Figura 5.19 apresenta-se a relação entre as diferenças de temperaturas propostas por Troufleur *et al.* (1997), uma proposta puramente empírica, que mostra que é possível estabelecer uma relação linear entre $T_r - T_o$ e $T_r - T_a$ com um coeficiente de determinação bastante elevado, quer no caso da alface quer no do tomate.

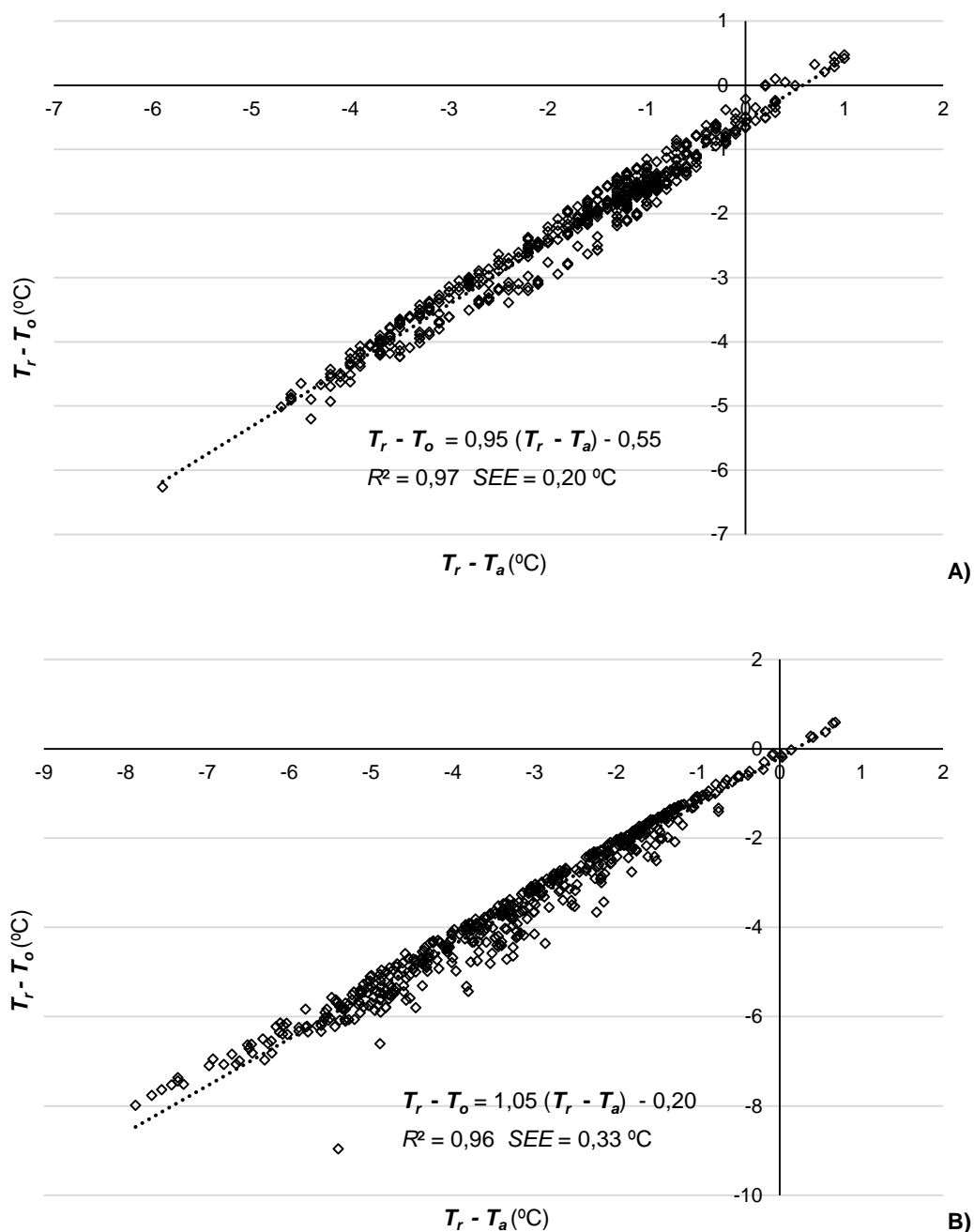


Figura 5.19 - Regressão linear entre a $T_r - T_o$ e $T_r - T_a$: A) na cultura da alface e B) na cultura do tomate. Os parâmetros da regressão são os seguintes: R^2 , coeficiente de determinação e SEE a estimativa de erro padrão.

Assim, utilizando a relação linear, descrita por Troufleur *et al.* (1997), equação [3.58], obtém-se uma estimativa de erro padrão de aproximadamente 0,20 na cultura da alface e de 0,33 na cultura do tomate; os valores obtidos de R^2 indicam que cerca de 97% e 96% da variabilidade total observada para $T_r - T_o$, nas culturas da alface e do tomate respectivamente, é explicada pelas retas de regressão linear obtidas (Quadro 5.2).

$$T_r - T_o = f(T_r - T_a) = \alpha_1 (T_r - T_a) + \alpha_2 \quad [3.58bis]$$

Quadro 5.2 – Parâmetros da relação linear entre a $T_r - T_o$ e $T_r - T_a$, na cultura da alface e do tomate.

	Alface	Tomate
α_1	0,95	1,05
α_2	-0,55	-0,20
Coefficiente de determinação, R^2	0,97	0,96
Estimativa do erro padrão, SEE	0,20	0,33

Os valores obtidos, por Troufleur *et al.* (1997), para os parâmetros α_1 e α_2 num local de savana em pousio e noutro com uma cultura de painço foram, respectivamente, $\alpha_1 = 0,79 / 0,74$ e $\alpha_2 = -0,26 / -0,54$ com um R^2 de 0,97 e 0,96, respectivamente.

Partindo das relações lineares obtidas, é possível substituir a T_o pela T_r na equação de fluxo de calor sensível, que fica com a forma:

$$H_{Tr} = \rho_a c_p \frac{(1 - \alpha_1) (T_r - T_a) - \alpha_2}{r_{aH}} \quad [5.2]$$

No entanto, embora a relação linear também neste estudo seja bem visível entre as diferenças de temperatura em causa, é de notar que a T_r neste estudo tomou valores sempre inferiores quer à T_o determinada quer à T_a medida, tanto para a alface como para o tomate. No estudo de Troufleur *et al.* (1997) aconteceu precisamente o oposto.

No Figura 5.20 podemos comparar a densidade de fluxo de calor sensível estimada pelo método proposto por Itier (1981) (H_{It}) no caso do tomate e pelo método da razão de Bowen (H_{rB}) no caso da alface com os valores estimados a partir do método proposto por Troufleur *et al.* (1997) (H_{Tr}) em ambas as culturas.

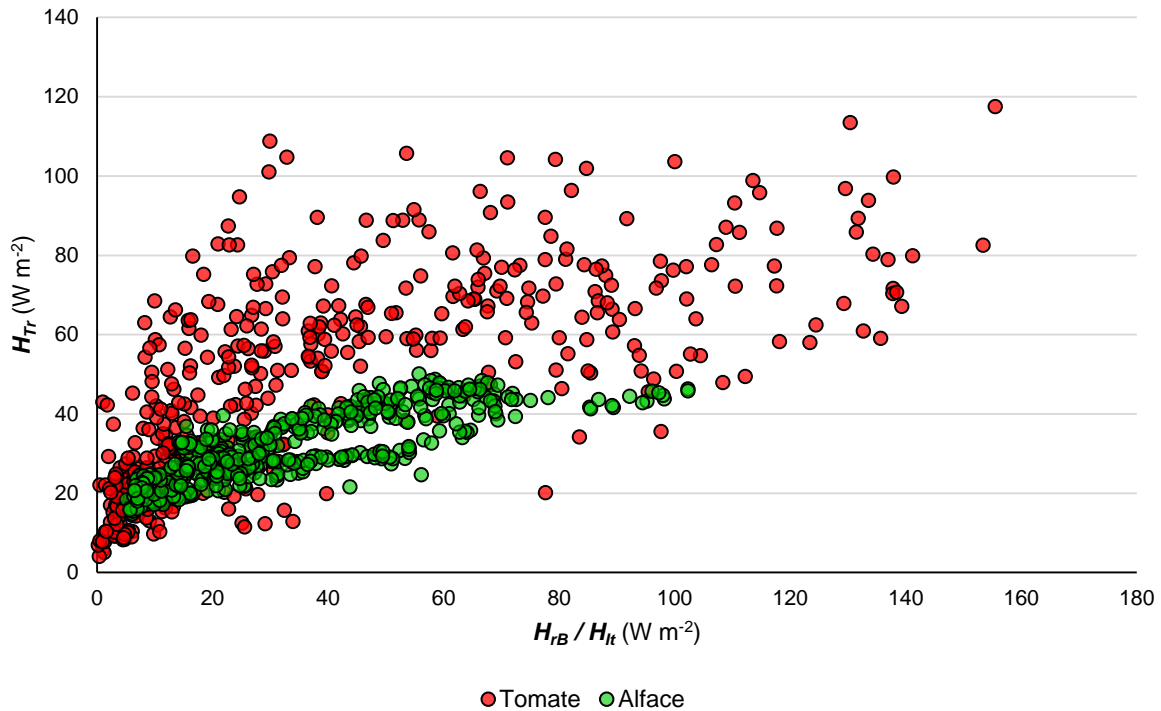


Figura 5.20 - Relação entre H_{Tr} e H_{It} na cultura do tomate e H_{Tr} e H_{RB} na cultura da alface.

Tal como no estudo de Troufleur *et al.* (1997), a relação encontrada entre o H calculado a partir da T_r (H_{Tr}) e o H determinado a partir da razão de Bowen (H_{RB}), método aplicado na cultura da alface, foi uma relação aproximadamente linear que permite explicar 66,3% da variabilidade total do H_{Tr} . Já a relação entre o H_{Tr} da cultura do tomate e do H calculado a partir do método proposto por Itier (H_{It}) não é linear, apresentado um padrão caótico à medida que o H toma maiores valores.

Apesar de não ter uma relação com um padrão definido na cultura do tomate, como acontece nos resultados obtidos por Troufleur *et al.* (1997), determinou-se o fluxo de calor latente como termo residual da equação do balanço de energia. Assim, a Figura 5.21 apresenta a relação entre o LE determinado a partir dos valores obtidos de H_{Tr} (LE_{Tr}) e a partir dos valores de H_{RB} e H_{It} (LE_{RB} e LE_{It}), para as culturas da alface e do tomate, respetivamente.

É possível verificar que a relação permite uma melhor estimativa na cultura da alface do que na do tomate, no entanto também na cultura do tomate a relação é praticamente linear e próxima da relação de 1:1, ainda que haja uma maior dispersão na qual resulta um valor de SEE superior para o tomate. No geral, para ambas as culturas existe uma relação quase linear entre o método da razão de Bowen, utilizado na cultura da alface, e do método proposto por Itier (1981) na cultura do tomate e o método proposto por Troufleur *et al.* (1997).

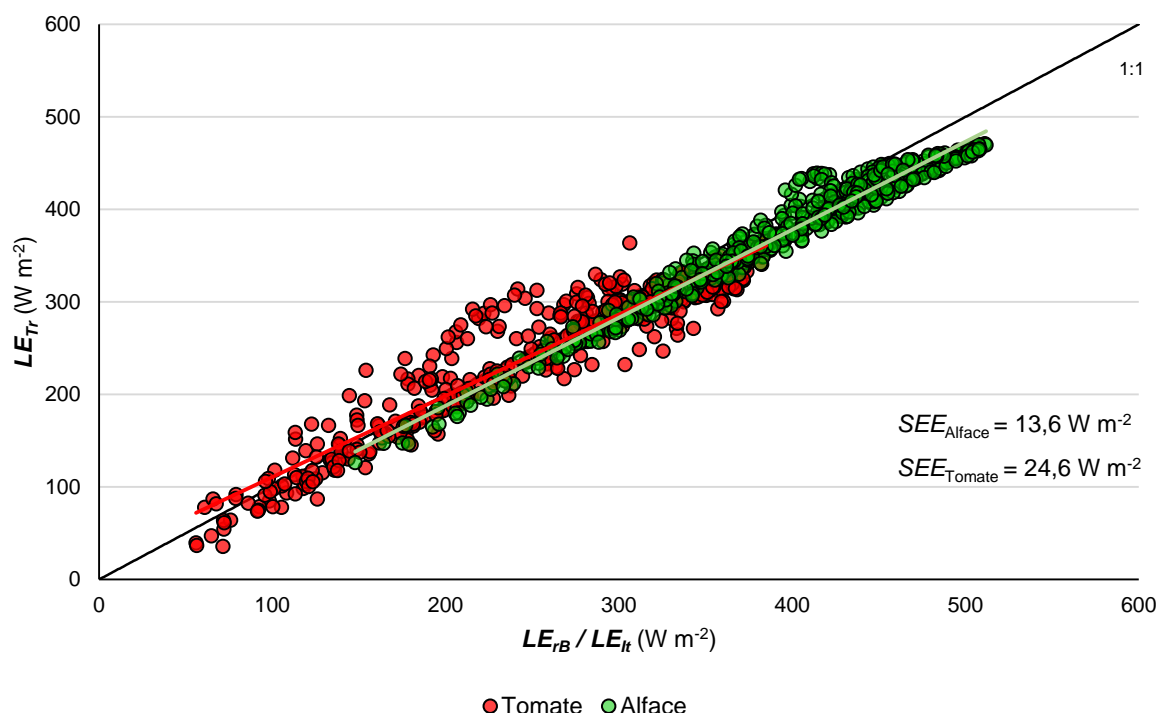


Figura 5.21 - Relação entre LE_{Tr} e LE_{It} na cultura do tomate e LE_{Tr} e LE_{rB} na cultura da alface. Com SEE , a estimativa do erro padrão.

Da análise dos resultados da relação entre o LE_{It} e do LE_{Tr} na cultura do tomate (Figura 5.21) verificamos que nos dados à esquerda do gráfico, sensivelmente até valores de LE_{It} de $250 W m^{-2}$, existe um conjunto de valores que se afastam ligeiramente da relação de 1:1 entre as duas variáveis. Já na cultura da alface, o mesmo não se verifica. Por forma a compreender que outras variáveis poderiam estar na origem desta maior variabilidade, constatámos que estes valores encontram-se em situações cuja r_a toma valores inferiores a $7,5 s m^{-1}$ a que correspondem valores da velocidade do vento superiores a $2,5 m s^{-1}$ aproximadamente. Na cultura da alface, o modelo foi aplicado da mesma forma, no entanto durante o período de ensaio verificaram-se valores de r_a superiores a $10 s m^{-1}$, o que pode justificar que a relação tenha um SEE muito baixo, e que os valores se mantenham sob a recta de 1:1.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo primordial deste trabalho consistia em estimar a evapotranspiração (ET), utilizando para o efeito valores de temperatura radiativa medidos com termómetro de infra-vermelhos. Consideraram-se duas culturas, a alface, que é de coberto total, e o tomate, de coberto parcial.

A ET foi estimada como termo residual do balanço de energia e comparada com dois métodos utilizados para esse efeito. No caso da cultura da alface, utilizou-se o método da razão de Bowen e para a cultura do tomate optou-se pelo método aerodinâmico proposto por Itier (1981). De seguida destacam-se algumas das considerações mais relevantes que surgiram no decorrer deste trabalho.

Relativamente aos componentes do balanço energético:

- a determinação da radiação líquida da vegetação (R_{nc}) em ambas as culturas, mostrou que esta componente tem um maior peso no balanço energético na cultura da alface do que na do tomate, justificável por se tratar de uma cultura de coberto total, o que reduz a importância da componente da radiação líquida do solo (R_{ns});
- não foi tida em conta a separação das componentes da radiação líquida, uma vez que na determinação da resistência aerodinâmica (r_a) foram considerados alguns parâmetros que têm em conta características da cultura, como por exemplo a sua altura (h_c) e rugosidade (z_o). Seria, no entanto, relevante no futuro o desenvolvimento de uma abordagem que permitisse considerar no cálculo da evapotranspiração a componente de maior peso da radiação líquida, no caso a R_{nc} , desconhecendo os valores de R_{ns} .

Relativamente à relação entre a temperatura radiativa (T_r) e a temperatura de bolbo molhado da superfície (T_{wo}):

- concluiu-se que existe uma relação linear entre T_r e T_{wo} , muito próxima da razão de 1:1, sobretudo na cultura da alface. No caso da cultura do tomate, verificou-se um maior afastamento, que poderá eventualmente estar relacionado com valores bastante variáveis da razão de Bowen (β) e com valores superiores de défice de pressão de vapor (DPV);
- embora a correlação entre as duas temperaturas seja bastante elevada, a determinação da densidade de fluxo de calor latente (LE) partindo da relação entre ambas, demonstrou-se pouco eficaz na cultura da alface e inútil na cultura do tomate.

Relativamente à relação entre a temperatura radiativa (T_r) e a temperatura aerodinâmica (T_o):

- verificou-se uma diferença entre T_r e T_o elevada, sobretudo na cultura do tomate, o que coincide com o observado por Kustas (1990) em culturas de coberto parcial. No presente estudo,

constatou-se que a diferença entre T_r e T_o toma sempre valores negativos e que T_r subestima constantemente T_o . Na cultura do tomate a relação entre estas sugere que a planta ajusta mais lentamente a sua temperatura face à temperatura aerodinâmica a partir de um certo limite, que, no caso em estudo, coincidiu com a temperatura de 21 °C, indicada por Almeida (2006) como a ótima para a fotossíntese na fase de floração.

- as maiores diferenças entre os valores das temperaturas, na cultura do tomate, coincidiram com baixos valores da r_a e com valores elevados da β . Após uma análise superficial dos dados, verificou-se que estes valores elevados de β ocorrem em simultâneo com variações repentinas da R_n . Isto vai de encontro ao que Jones (1983) afirma - as oscilações ambientais interferem na resposta das plantas que não é tão rápida, e por isso no seu ajustamento às mesmas;

- aplicando o método de Troufleur *et al.* (1997), que parte da relação linear entre duas diferenças de temperaturas ($T_r - T_o$; $T_r - T_a$) para determinar a densidade de fluxo de calor sensível (H) e, consequentemente, através da equação de balanço de energia, o LE , chegámos a resultados satisfatórios em ambas as culturas com uma estimativa de erro padrão de 13,6 W m⁻² na cultura da alface e de 24,6 W m⁻² na cultura do tomate.

Assim, havendo uma estimativa da LE obtida por medições da temperatura radiativa das plantas, é possível traduzi-la em evapotranspiração com resultados bastante aceitáveis, tanto para uma cultura de coberto total como para uma cultura de coberto parcial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adaixo, M.M.S. (1999) *Evapotranspiração de Referência – Validação de metodologias de cálculo para Portugal Continental*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Perrier, A. (1994) An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43(2): 35-92.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) *Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Roma.
- Almeida, D. (2006) *Manual de Culturas Hortícolas*. Editorial Presença. Lisboa. Vol I: 158-180.
- Alves, I.M. (1995) *Modelação da evapotranspiração cultural. Resistências aerodinâmica e do coberto*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 148 pp.
- Alves, I., Pereira, L.S. (2000) Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach. *Irrigation Science* 19: 101-106.
- Anderson, M.C., Norman, J.M., Diak, G.R.M, Kustas W.P., Mecikalski, J.R. (1997) A Two-Source Tome Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing. *Remote Sens. Environ.* 60: 195-216.
- Brutsaert, W. (1982) *Evaporation into the Atmosphere*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands, 299 pp..
- Campbell, G.S., Norman, J.M. (1998) *An Introduction to Environmental Biophysics*. (2ª ed.) Springer Verlag New York, Inc.
- Cellier, P., Richard, G., Robin, P. (1996) Partition of sensible heat fluxes into bare soil and the atmosphere. *Agricultural and Forest Meteorology* 82: 245-265.
- Chehbouni, A., Seen, D. L., Njoku, E.G., Monteny, B.M. (1996) Examination of the Difference between Radiative and Aerodynamic Surface Temperatures over Sparsely Vegetated Surfaces. *Remote Sensing of Environment* 58: 177-186.
- Choudhury, B.J., Reginato, J.R., Idso, S.B. (1986) An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology* 37: 75-88.
- Choudhury, B.J., Monteith, J.L. (1988) A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 114: 373-398.

- Clothier, B.E., Clawson, K.L., Pinter, P.J. Jr., Moran, M.S., Reginato, R.J., Jackson, R.D. (1986) Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agricultural and Forest Meteorology* 37: 319-329.
- Conceição, N.M.S. (2007) *Balço energético e coeficientes culturais em Pyrus communis L. Cv. 'Rocha'*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 60 pp.
- Dias, M.M.R.L. (1997) *Determinação de Coeficientes Culturais na Cultura do Tomate*. Relatório do Trabalho de Fim de Curso de Engenharia Agronómica, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Dyer, A.J. (1974) A review of flux-profile relationships. *Boundary – Layer Meteorology* 7: 363-372.
- Farahani, H.J., Howell, T.A., Shuttleworth, W.J., Bausch, W.C. (2007) Evapotranspiration: Progress in Measurement and Modeling in Agriculture. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 1627-1638.
- FAO (2011) *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.
- Gama, M.I.F.R.F. (1987) *Evapotranspiração Real – Estudo realizado na cultura do tomate em região de clima mediterrânico*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Gardner, B.R., Nielsen, D.C., Shock, C.C. (1992) Infrared Thermometry and the Crop Water Stress Index. II. Sampling Procedures and Interpretation. *Journal of Production Agriculture* 5: 466-475.
- Gowda, P.H., Chavez, J.L., Colaizzi, P.D., Evett, S.R., Howell, T.A., Tolk, J.A. (2007) ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science* 22.
- Hall, G.H., Huemmrich, K.F., Coetz, S.J., Sellers, P.J., Nickeson, J.E. (1992) Satellite remote sensing of surface energy balance: success, failure, and unresolved issues in FIFE. *J. Geophys. Res.* 97: 19061-19089.
- Huband, N.D.S., Monteith, J.L. (1986) Radiative Surface Temperature and Energy Balance of a Wheat Canopy – I. Comparison of Radiative and Aerodynamic Canopy Temperature. *Boundary-Layer Meteorology* 36: 1-17.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24: 45-55.
- Itier, B. (1981) Une méthode simple pour la mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle. *Agronomie* 1: 869-876.
- Jackson, R.D. (1981) *Canopy temperature and crop water stress*. Advances in Irrigation (ed. D.Hillel). Academic Press, New York, USA. Vol 1, pp. 43-85.

- Jarvis, P.G. (1976) The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 273: 593-610.
- Jensen, H.E., Svendsen, H., Jensen, S.E., Mogensen, V.O. (1990) Canopy-air temperature of crops grown under different irrigation regimes in a temperature humid climate. *Irrigation Science* 11: 181-188.
- Jones, H.G. (1983) *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press.
- Jones, H.G., Tardieu, F. (1998) Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 21-46.
- Jones, H.G. (1999) Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 95: 139-149.
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J.L., Sauer, T.J., Ben-Gal, A. (2014) A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 184: 56-70.
- Kustas, W.P., Choudhury, B.J., Moran, M.S., Reginato, R.J., Jackson, R.D., Gay, L.W., Weaver, H.L. (1989) Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agricultural and Forest Meteorology* 44: 197-216.
- Kustas, W.P. (1990) Estimates of evapotranspiration with a one- and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. *Journal of Applied Meteorology* 29: 704-715.
- Lagos, L.O., Martin, D.L., Verma, S.B., Suyker, A., Irmak, S. (2009) Surface energy balance model of transpiration from variable canopy cover and evaporation from residue-covered or bare-soil systems. *Irrigation Science* 28: 51-64.
- Lhomme, J.P., Monteny, B. (1993) Estimates of convective fluxes over sparse canopy from infrared temperature. *Proceedings of the Yokohama Symposium – Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales* 212: 437-443.
- Lhomme, J.P., Troufleau, D., Monteny, B., Chehbouni, A., Bauduin, S. (1997) Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation II. A model for the K_b^{-1} parameter. *Journal of Hydrology* 188-189: 839-854.
- Lui, S., Lu, L., Mao, D., Jia, L. (2007) Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 11: 769-783.
- Mayocchi, C.L., Bristow, K.L. (1995) Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 75: 43-50.
- Monteith, J.L. (1965) Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19: 205-234.
- Monteith, J.L. (1973) *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London.

- Monteith, J.L. (1981) Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107: 1-27
- Monteith, J.L., Unsworth M.H. (1990) *Principles of environmental physics*. Edward Arnold. London.
- Norman, J.M., Becker, F. (1995) Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology* 77: 153-166.
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S. (1995) Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 77: 263-293.
- Oliveira, I. (2011) *Técnicas de Regadio* (2ª ed.). Rolo & Filhos II, SA. Beja, 1766 pp.
- Owen, P.R., Thomson, W.R. (1963) Heat transfer across rough surfaces. *Journal of fluid mechanics* 15: 321-334.
- Paço, M.T.G.A. (2003) *Modelação da Evapotranspiração em Cobertos Descontínuos. Programação da Rega em Pomar de Pessegueiro*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 227 pp.
- Pêgo, M.R.R. (1993) *Avaliação de um Sistema de Rega Localizada*. Relatório do Trabalho de Fim de Curso de Engenharia Agronómica, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London* 193: 120-145.
- Pereira, L.S. (2004) *Necessidades de Água e Métodos de Rega*. Publicações Europa-América. Lisboa.
- Perez, P.J., Lecina, S., Castellvi, F., Martinez-Cob, A., Villalobos, F.J. (2006) A simple parameterization of bulk canopy resistance from climatic variables for estimating hourly evapotranspiration. *Hydrological Processes* 20: 515-532.
- Pieri, P., Fuchs, M. (1990) Comparison of Bowen ratio and aerodynamic estimates of evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 49: 243-256.
- Rana, G., Kateji, N. (2000) Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13: 125-153.
- Rodrigues, P. (2011) *Influência do regime hídrico e da rega no comportamento da casta Touriga Nacional na região do Dão*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 304 pp.
- Shaw, R.H., Pereira, A.R. (1982) Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. *Agricultural Meteorology* 26: 51-65.
- Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S. (1985) Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 111: 839-855.

- Shuttleworth, W.J., Gurney, R.J. (1990) The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 116: 497-519.
- Stewart, J.B., Kustas, W.P., Humes, K.S., Nichols, W.D., Moran, M.S., de Bruin, H.A.R. (1994) Sensible Heat Flux-Radiometric Surface Temperature Relationship for Eight Semiarid Areas. *Journal of Applied Meteorology* 33: 1110-1117.
- Stone, L.R., Kanemasu, E.T. (1975) Grain sorghum canopy temperature as influenced by clouds. *Remote Sensing of Environment* 4: 177-181.
- Troufleau, D., Lhomme, J.P., Monteny, B., Vidal, A. (1997) Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation. I. An experimental analysis of the KB^{-1} parameter. *Journal of Hydrology* 188-189: 815-838.
- Verma, S.B., Rosenberg, N.J., Blad, B.L. (1978). Turbulent Exchange Coefficients for Sensible Heat and Water Vapor under Advective Conditions. *Journal of Applied Meteorology* 17: 330-338.

ANEXOS

ANEXO I – Organograma do modelo proposto por Itier (1981) para o cálculo do H . u_1 e u_2 são velocidades do vento medidas a duas alturas diferentes z_1 e z_2 , g é a aceleração da gravidade e θ a temperatura em (K) (adaptado de Itier, 1981).

